

早稲田大学審査学位論文
博士（スポーツ科学）

球技系競技における効果的なハーフタイム・
リウォームアッププロトコルの検討

The practical and effective protocol of half-time
re-warm up in intermittent team sports

2019年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科
柳岡 拓磨

YANAOKA, Takuma

研究指導教員： 広瀬 統一 教授

目次

第 1 章 序論.....	1
第 1 節 序.....	1
第 2 節 研究小史.....	4
第 3 節 本論文の目的および構成	14
第 2 章 異なる RW の運動時間が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影 響.....	18
第 1 節 緒言	18
第 2 節 方法	19
第 3 節 結果	25
第 4 節 考察	34
第 5 節 結論	38
第 3 章 異なる RW の運動強度が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影 響.....	39
第 1 節 緒言	39
第 2 節 方法	40
第 3 節 結果	45
第 4 節 考察	54
第 5 節 結論	58
第 4 章 エネルギー消費量を統一した異なる構成の RW が 間欠性スプリントパ フォーマンスに与える影響	59
第 1 節 緒言	59
第 2 節 方法	60
第 3 節 結果	66
第 4 節 考察	78

第5節 結論	83
第5章 総合考察	85
第1節 RW プロトコルと高強度運動パフォーマンス向上効果	85
第2節 RW の高強度運動パフォーマンス向上効果の個人差	87
第3節 RW プロトコルと生理学的指標	89
第4節 今後の展望	93
第6章 結論	95
参考文献	97

本博士論文は以下の研究成果を基に執筆された。

【第 2 章】

・ 原著論文

Yanaoka, T, Kashiwabara, K, Masuda, Y, Yamagami, J, Kurata, K, Takagi, S, Miyashita, M, and Hirose, N. The effect of half-time re-warm up duration on intermittent sprint performance. *J Sports Sci Med*. 17: 269-278, 2018.

・ 学会発表

柳岡拓磨、柏原杏子、増田雄太、倉田クラン、高木俊、宮下政司、広瀬統一.
異なる時間の Half-time re-warm up が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響. 第 72 回日本体力医学会大会. 愛媛、2017 年 9 月 18 日. 口頭発表.

Yanaoka T, Masuda Y, Yamagami J, Kashiwabara K, Kurata K, Kidokoro T, Miyashita M, Hirose N. The effect of different durations of half-time re-warm up on the subsequence sprint performance. 22nd European College of Sport Science Annual Congress in MetropolisRuhr, Germany, 6 July 2017. Min-oral communications.

・ 受賞

2016-2017 年度日本体力医学会国際学術交流奨励賞. 2017 年 9 月 17 日

【第 3 章】

・ 原著論文

Yanaoka, T, Hamada, Y, Kashiwabara, K, Kurata, K, Yamamoto, R, Miyashita, M, and Hirose, N. Very-short-duration, low-intensity half-time re-warm up increases

subsequent intermittent sprint performance. *J Strength Cond Res.* 32: 3258-3266, 2018.

・学会発表

柳岡拓磨、濱田有香、柏原杏子、倉田クラン、山本遼、宮下政司、広瀬統一．異なる強度のハーフタイム・リウォームアップが間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響．第 31 回日本トレーニング科学会大会．愛知、2018 年 10 月 27 日．ポスター発表．

Yanaoka T, Hamada Y, Kashiwabara K, Kurata K, Yamamoto R, Miyashita M, Hirose N. A short-duration, low-intensity half-time re-warm up increases intermittent sprint performance over the 10-min following half-time. 23rd European College of Sport Science Annual Congress, Dublin, Ireland, July 2018. Min-oral communications.

・受賞

第 3 回日本体力医学会国際学術交流奨励賞．2018 年 9 月 8 日

第 31 回日本トレーニング科学会 トレーニング科学研究賞奨励賞．2018 年 10 月 28 日

【第 4 章】

・学会発表

柳岡拓磨、濱田有香、藤平杏子、山本遼、岩田理沙、宮下政司、広瀬統一．エネルギー消費量を統一した異なる構成のハーフタイム・リウォームアップがスプリントパフォーマンスに与える影響．日本フットボール学会 16th Congress. 千葉、2018 年 12 月 23 日．口頭発表．

第 1 章

序論

第 1 節 序

球技系競技における運動形態は広く研究されており、特にサッカーの試合中の運動形態に関する報告が多い(3,8,26,29,35,36,40,41,63)。これらの報告によると、サッカー選手の 1 試合の平均移動距離は 9 - 12 km であり、その運動強度は低・中・高強度と様々である(8,35)。選手の競技レベル別に運動形態を観察した研究では、FIFA ランキングで 10 位以内のナショナルチームに選抜されているトップレベルの選手はデンマーク 1 部リーグに所属している中程度のレベルの選手と比較し、時速 15 km 以上の高強度運動および時速 30 km 以上のスプリントの平均移動距離が有意に長く、時速 15 km 未満の低強度運動の平均移動距離には有意な差が認められないことが明らかとなっている(35)。また、トップレベルの選手は中程度のレベルの選手と比較し、1 試合の平均移動距離が有意に長い、その差は高強度運動およびスプリントの平均移動距離の差とほぼ同様であることが明らかとなっている(35)。さらに、2014 年から 2016 年までのドイツ・ブンデスリーガの試合を対象に選手の運動形態と試合の勝敗との関連を検討した研究で、勝利した試合においてフォワードおよびサイドアタッカーの 21 km/h 以上の高強度運動およびスプリント量が高値を示していたことが報告されている(9)。これらのことから、高強度運動量およびスプリントパフォーマンスは球技系競技において重要であることが推察され、多くの先行研究でも試合中の高強度運動量およびスプリントパフォーマンスに関する検討がなされている(8,29,35,40,63)。

高強度運動に着目すると、サッカーの試合中に高強度運動量が低下するピリオドは 3 つ存在することが報告されており、1) 高強度運動による走行距離が最

も長かった 5 分間の後の 5 分間、2) 試合終了前の 15 分間、3) 後半開始直後の 15 分間である(36)。先行研究によると、これらの高強度運動量の低下はそれぞれにメカニズムが異なる(36)。1) 高強度運動による走行距離が最も長かった 5 分間の後の 5 分間は、活動筋内の乳酸・カリウムイオンの蓄積、クレアチンリン酸 (PCr) の減少など、2) 試合終了前の 15 分間の高強度運動量の低下は、筋グリコーゲン量の減少および脱水が主な原因である(36)。1)、2)に関しては一般的に疲労と定義づけられる要素が原因で高強度運動が低下するものの、3) 後半開始直後の 15 分間の高強度運動量の低下の主な原因は、ハーフタイム中に安静を保ち続けることによる後半に向けた身体的準備不足、特に深部体温、筋温の低下である可能性が指摘されている(15,36,51,54)。一般的に 15 分間のハーフタイムでは個人間・チームでのミーティング、前半における負傷への対応、衣服・用具の交換、飲水などを含む栄養学的サポートなどを実施し、選手は安静を保ちながら過ごしている(62)。このように安静状態を保つことが影響し、実際の試合の後半開始直後 15 分間の高強度運動量は、前半の同じ時間帯と比較し有意に低下していることが報告されている(8,63)。Weston らはイングランド・プレミアリーグの試合を対象に、前・後半開始直後の 15 分間の選手、審判員の高強度運動量を比較し、選手では 8.5%、審判員では 10%程度、後半に高強度運動量が低下することを報告している(63)。暑熱環境下においても、後半開始直後の 5 分間のピークスプリントスピードは、前半開始後の 5 分間中のピークスプリントスピードと比較し、有意に低いことが明らかとなっている（前半：27.9±1.3 km/h、後半：23.6±1.3 km/h）(38)。従って、後半開始直後の高強度運動量およびスプリントパフォーマンスの低下を抑制するためには、ハーフタイム中の過ごし方（ハーフタイム戦術）を検討することが重要であると考えられる。

近年、後半開始直後の高強度運動量およびスプリントパフォーマンスの低下

抑制を目的として、ハーフタイム中に低・中強度のウォーミングアップを改めて実施すること（ハーフタイム・リウォームアップ：RW）の効果を検証する研究が散見されている(11,15,30,31,37,49,50,54,69,71)。すべての先行研究で 15 分間の安静を保った場合と比較し、運動を伴った RW を実施することによって後半開始直後の運動パフォーマンスの低下を抑制できることが報告されている(11,15,30,31,37,49,50,54,69,71)。しかし、先行研究で検討されている RW プロトコルの多くは 7 分間・中強度の運動であるが(11,15,30,31,37,49,50,54,69,71)、このプロトコルはその運動時間の長さから実際の試合では実施が困難であることが指摘されている(51,62)。上述した通り、一般的に 15 分間のハーフタイムで選手は個人間・チームでのミーティング、前半における負傷への対応、衣服・用具の交換、飲水などを含む栄養学的サポートなどを行う必要がある(62)。Towlson らはイングランド・プレミアリーグ、フットボールリーグ・チャンピオンシップに所属しているチームのフィジカルコーチ 44 名にアンケート調査を実施し、実際の試合で RW のために確保できる時間が約 3 分程度であることを報告している(62)。また、ラグビーなど試合中に衝突が多いスポーツはハーフタイム中に治療に充てる時間がさらに必要となる。

試合前に実施されるウォーミングアップは、その時間・強度・回復時間（ウォーミングアップ終了から競技開始までの時間）の 3 要素で規定され、これらの組み合わせによって、ウォーミングアップが引き起こす運動パフォーマンスの促進作用が決定される(33)。RW に関する先行研究では、時間は 7 分間、強度は最大心拍数（HR_{max}）の 70%程度、回復時間は 1 分（控室からフィールドへの移動時間を想定）で規定されているものが多い(11,15,30,31,37,49,50,54,69,71)。回復時間に関しては、ミーティングなどの他の業務を分断しないよう後半開始直前が好ましいと考えられるが、RW の時間および強度に関して検討した先行研究は報告されていない。従って、現場応用の観点から 3 分以内の RW であっ

でも後半開始直後の運動パフォーマンスの維持に寄与するか、また短時間の枠組みの中で効果的な RW の強度および RW の時間と強度の組み合わせを検討する必要がある。また、効果的な RW プロトコルを検討するためには運動パフォーマンスに影響を与えるメカニズムを明らかにすることも重要である。ウォーミングアップによる運動パフォーマンス向上のメカニズムは、体温・代謝・筋活動の上昇および亢進が挙げられる(4,5,33)。従って、時間や強度などの RW プロトコルを検討すると同時に RW が運動パフォーマンスに与えるメカニズムを体温・代謝・筋活動の 3 点から検討する必要があると考えられる。

第 2 節 研究小史

第 1 項 ウォーミングアップとハーフタイム・リウォームアップ

練習および試合の前に実施するウォーミングアップは広く用いられており、その後の運動に対する多数の生理学的反応を引き起こすことで、その後の運動パフォーマンスを向上させる(54)。ウォーミングアップによる生理学的反応は、体温に関連した効果、代謝に関連した効果、筋活動に関連した効果の 3 つに分類される(33)。

ウォーミングアップの第一の目的は、体温の向上である。ウォーミングアップによる体温の上昇は主に 4 つの生理学的反応を引き起こす。すなわち、1) PCr 消費率の増加、水素イオンの蓄積、嫌気性解糖および筋グリコーゲン分解の増加に起因するアデノシン三リン酸 (ATP) の代謝の加速、2) 筋線維伝導速度 (MFCV) の加速、3) 筋、関節における粘性抵抗の低減、4) ボーア効果による酸素運搬能の向上である(4,5,33)。特に、筋のパワー出力と筋温の間には強い関係があり、その後の筋収縮のタイプ、速度に依存するものの、筋温の 1°C の上昇は筋のパワー出力を 2~5%向上させる(46)。

ウォーミングアップは、活動筋への血流量の増加、運動前の酸素摂取量 (VO_2)

の増加による運動開始後の無酸素性代謝の減少などの代謝の亢進も引き起こす(4,5,33)。活動筋への血流量の増加は、活動筋への酸素供給量の増加に繋がる(22)。筋内の酸素利用性の増加は、スプリントなどの高強度運動後に低下した PCr の再合成を加速させることにより、間欠性高強度運動パフォーマンスの維持に貢献する(13,16)。また、運動前の VO_2 の増加による運動開始後の無酸素性代謝の減少は、運動終盤の嫌気性代謝を温存し、持久性運動パフォーマンスを向上させる可能性がある(4,5,33)。

運動中の筋活動は過去の収縮刺激（コンディショニング収縮）に応じて変化し、最大下あるいは最大強度の筋活動後に筋パフォーマンスが向上する(61)。この現象を活動後増強（PAP）と呼び、ウォーミングアップの 1 つの手法として用いられている(61)。PAP の正確なメカニズムは明らかとなっていないものの、2 つの主要因（ミオシン調節軽鎖のリン酸化および動員順序のより高い運動単位の動員増加）と 1 つの潜在的な因子（筋の羽状角の変化）がメカニズムとして考えられている(28)。実際に、Zois らはアマチュアサッカー選手を対象に試合前のウォーミングアップとしての PAP が 20 m スプリントパフォーマンスに与える影響を検討しており、通常のサッカーの試合前に用いるウォーミングアップおよび Small sided-game と比較し、PAP を用いたウォーミングアップを実施した場合に最もスプリントパフォーマンスが高値を示したことを報告している(72)。

このようにウォーミングアップによる体温、代謝、筋活動に関連した効果によって、その後の運動パフォーマンスが向上するが、これらの効果はウォーミングアップ後に安静を保つことで速やかに消滅することも報告されている(5)。ウォーミングアップによって上昇した筋温および VO_2 はそれぞれ 15～20 分、5 分程度で有意に減少する(5)。PAP は、コンディショニング収縮の内容によるものの、10 分程度でその効果が消滅することが報告されている(24)。球技系競技

におけるハーフタイムの時間は競技によりさまざまであるが、10~20 分程度である。従って、ハーフタイム中に安静を保ち続けることによって、運動パフォーマンス向上に寄与する体温、代謝、筋活動に関連した効果が低減する可能性がある。例えば、サッカー審判員の前半終了時の大腿四頭筋の筋温は約 38.8°C であるが、ハーフタイムに安静を保つことで後半開始時には約 37.5°C に低下することが報告されている(25)。

ウォーミングアップによって運動パフォーマンスを最大化するためには、その時間・強度・回復時間で規定されるプロトコルを適切に設定し、体温、代謝、筋活動を亢進、疲労を誘発させないことが重要である(33)。ウォーミングアップの目的は安静状態から運動を負荷することで体温、代謝、筋活動を亢進させることであるが、RW の目的は前半中に亢進した体温、代謝、筋活動の抑制を予防、または再亢進させることである。従って、多くの先行研究で明らかにされてきたウォーミングアップのプロトコルを RW に応用させた場合に同様の結果が得られるかは不明であり、RW の時間、強度などのプロトコルの変化が運動パフォーマンスおよび体温、代謝、筋活動に与える影響を検討する必要がある。

第 2 項 ハーフタイム・リウォームアップが運動パフォーマンスに与える影響

2-1. ハーフタイム・リウォームアップの運動パフォーマンス向上効果

RW が後半開始直後の運動パフォーマンスおよび生理学的指標に与える影響は 7 つの研究で検討されている(11,30,31,37,49,69,71) (表 1-1)。2 つの研究では 90 分間のサッカーの試合(11,37)、5 つの研究では競技特異的な間欠性運動(30,31,49,69,71)を用いて、RW の効果を検討している。これらの研究で用いられている RW は、70%HR_{max} 程度の強度のランニング(11,37,49,69)、サイクリン

グ(31)、アジリティーエクササイズ(30,31)やスクワットの姿勢を維持した状態での振動刺激(30)、5 Repetition maximum (RM) のレッグプレス(71)、2 対 2 の Small sided-game(71)など様々であるが、その運動時間は 5~10 分間である。

これらのすべての研究において、運動を伴った RW はハーフタイム中に安静を保ち続けることによる後半開始直後の生理学的指標（心拍数、深部体温、筋温）および運動パフォーマンス（ジャンプ、スプリント、移動距離）の低下を抑制することが報告されている(11,30,31,37,49,69,71)。例えば、Mohr らは初めて RW の有用性を明らかにしており、デンマーク 4 部リーグの選手を対象に実際の試合のハーフタイム中に 7 分間（15 分間中の 7-14 分）・中強度（目標心拍数：135 拍/分）の RW を実施することで後半開始前の 30 m スプリントパフォーマンスの低下を抑制したことを報告している(37)。さらに、プロサッカー選手を対象に実際のサッカーの試合を用いて RW の効果を検討した Edholm らの研究では、ハーフタイムにおいて 15 分間の安静を保ち続けるコントロール試行では、後半開始前のスプリントおよびジャンプパフォーマンスは前半終了時と比較して、それぞれ 2%、6.7%の低下を示した一方、7 分間・70% HR_{max} の強度のランニングを実施する RW 試行はこの低下を抑制することを明らかにしている(11)。また、RW はスプリントやカウンタームーブメントジャンプなどの瞬発的運動能力のみならず、Bangsbo Field Test や Yo-Yo Intermittent Recovery Test など持久性運動パフォーマンステストの成績も安静を保った場合と比較し、向上させることが報告されている(31,69)。Yanaoka らはサッカー審判員を対象にサッカー審判員の前半の活動を模した Loughborough Intermittent Shuttle Test 後の RW が間欠性全身持久力を評価する Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1 の成績に与える影響を検討している(69)。15 分間のハーフタイム中に安静を保ったコントロール試行では、Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 1 の走行距離が 2,904±421 m であったものの、2 分 20 秒の 70% HR_{max} の強度のランニングを

計 3 回実施する RW を実施した RW 試行では $3,095 \pm 326$ m であり、有意な高値を示したことを報告している(69)。さらに、RW は運動能力のみならず、技術パフォーマンスの低下も抑制する可能性を示しており、Small sided-game を用いた RW は安静を保った場合と比較し、Loughborough soccer passing test で評価した技術パフォーマンスも向上させることが明らかとなっている(71)。

一方で、RW は試合終了前の運動パフォーマンスには影響を与えないことが 2 つの研究で報告されている(30,37)。Mohr らは、試合終了後の 30 m スプリントパフォーマンスはハーフタイムに安静を保ったコントロール試行、RW 試行共に試合開始前より低値を示すものの、試行間の有意な差は認められないことを明らかにしている(37)。Lovell らも同様に、コントロール試行、RW 試行共に試合終了後の 10 m スプリントパフォーマンス、カウンタームーブメントジャンプパフォーマンスで両試行間に有意な差が認められないことを明らかにしている(30)。これらのことから RW は、RW 自体もしくは RW による後半開始直後の運動パフォーマンス向上によって追加的な疲労は引き起こさず、試合終了前の運動パフォーマンスを低下させる可能性は低いことが推察される。

2-2. ハーフタイム・リウオームアップの運動パフォーマンス向上効果の個人差

運動パフォーマンスを向上させるための方略は、選手の競技レベルによって効果が異なる可能性がある(15)。これまでの RW に関する先行研究における対象者を表 1-1 に示した。RW に関する先行研究が 7 つではあるものの、エリート、プロフェッショナル、セミプロフェッショナル、アマチュア、審判員とその競技レベルや役割に関わらず、全ての研究で運動を伴った RW は同様に運動パフォーマンスを向上させる結果が得られている(11,30,31,37,49,69,71)。従って、競技レベル間の RW の運動パフォーマンス向上効果を同じ研究内で比較した先

行研究はないものの、RW は競技レベルに関わらず後半開始直後の運動パフォーマンスを向上させることが推察される。

一方で、 VO_{2max} やスプリントパフォーマンスなどの被験者のフィットネスレベルで RW の効果の個人差を検討した報告はない。7 つの RW に関する先行研究で、被験者の VO_{2max} を示している報告は 2 つに限られる(30,31)。2 つの研究とも被験者の平均の VO_{2max} は、約 60 ml/kg/min である(30,31)。従って、RW の運動パフォーマンス向上効果の個人差の有無をより詳細に検討するためには、被験者のフィットネスレベルが RW の運動パフォーマンス向上効果に影響を与えるか検討する必要があると考えられる。

表 1-1 ハーフタイム・リウオームアップと運動パフォーマンス

著者 (発表年)	被験者	ハーフ タイム (分)	RW strategy				結果	
			時間 (分)	強度	回復時間 (分)	様式	項目	効果
Edholm et al (2015)	男子プロサッカー 選手22名	15分	RW1	安静座位			10 mスプリント	RW2>RW1
			RW2	70% HRmax	1	Jogging	CMJ	RW2>RW1
Lovell et al (2007)	男子エリートサッ カー選手7名	15分	RW1	安静座位				
			RW2	70% HRmax	1	Cycling	BFT	RW2=RW3>RW1
			RW3	70% HRmax	1	Agility sprint		
Lovell et al (2013)	男子セミプロサッ カー選手22名	15分	RW1	安静座位			10 mスプリント	RW2>RW1
			RW2	70% HRmax	1	Agility exercise	CMJ	RW2>RW1
			RW3	スクワット 姿勢の維持	1	振動刺激		
Mohr et al (2004)	男子セミプロサッ カー選手16名	15分	RW1	安静座位			30 mスプリント	RW2>RW1
			RW2	70% HRmax	1	Jogging		
Russell et al (2018)	男子プロラグビー 選手20名	15分	RW1	安静座位			RSSA	RW3>RW2>RW1
			RW2	135拍/分	0	Jogging	CMJ	RW3>RW2>RW1
			RW3	135拍/分	0	Jogging		
			(併用)			Passive heating		
Yanaoka et al (2018)	男子サッカー審判 員10名	15分	RW1	安静座位			Yo-Yo IRI1	RW2>RW1
			RW2	70% HRmax	0	Jogging		
Zois et al (2013)	男子アパチュア サッカー選手8名	15分	RW1	安静座位			RSA	RW2>RW1
			RW2	SRM	Adequate	Leg press	CMJ	RW2=RW3>RW1
			RW3		Adequate	SSG	LPST	RW3>RW1

BFT bangsbo field test, *CMJ* counter-movement jump, *LSPPT* loughborough soccer passing test, *RM* repetition maximum, *RSA* repeated-sprint ability, *RSSA* repeated shuttle sprint ability, *SSG* small sided-game, *Yo-Yo IRI* Yo-Yo Intermittent Recovery Test level 1

第3項 ハーフタイム・リウォームアップが生理学的指標に与える影響

ハーフタイム・リウォームアップが生理学的指標に与える影響として、筋温(30,37)、深部体温(31,49)、心拍数(11,30,31,37,69)、 VO_2 (30)、血中代謝関連項目(69)の5つの指標が評価されている。

筋温は筋のパワー出力と強く関係しており(46)、サッカーの試合のハーフタイム中の筋温とスプリントパフォーマンスの変動にも正の相関関係が認められることが報告されている(37)。Mohr らは実際の試合を用いた研究で、ハーフタイム前後でのスプリントパフォーマンスの低下はハーフタイム中の筋温の低下と正の相関関係($r=0.6$)があることを報告し、ハーフタイム中の筋温の低下を抑制することがスプリントパフォーマンスの低下を抑制するうえで重要である可能性を示している(37)。この研究ではハーフタイムを安静に保った場合、筋温は約 2.0°C 低下する一方、RW を実施することでこの低下を約 0.5°C に抑えたことを報告している(37)。また Lovell らも同様に、ハーフタイムを安静に保った場合の筋温の約 1.5°C の低下を、RW を実施することにより約 0.5°C の低下に抑えたことを報告している(30)。

RW は深部体温の低下も抑制することが明らかとなっている。Lovell らは2回の Bangsbo Field Test 間の15分のハーフタイムにおける安静座位、7分間のサイクリングおよびアジリティーエクササイズが深部体温に与える影響を検討しており、安静座位、サイクリングおよびアジリティーエクササイズではハーフタイム間にそれぞれ約 1.0°C 、約 0.5°C 、約 0.8°C 低下すること報告し、安静座位と比較し、サイクリング運動では有意に低下を抑制し、アジリティーエクササイズでは低下を抑制する傾向があることを報告した(31)。また Russell らは2回の Repeated shuttle sprint 間の15分のハーフタイムにおける安静座位、7分間・心拍数約135拍/分程度のRWおよび8分間の Blizzard Survival Jacket（低体温症患者の深部体温管理のために用いられる保温ウェア）の着用と7分間・

心拍数 135 拍/分程度の RW の併用が深部体温に与える影響を検討している(49)。RW は安静座位による深部体温の低下を有意に抑制したものの、その効果は Blizzard Survival Jacket の着用と RW の併用よりも有意に低かった(49)。2 回目の Repeated shuttle sprint パフォーマンスも深部体温の変化と同様に、Blizzard Survival Jacket の着用と RW の併用、RW、安静座位の順に高値を示した。従って、深部体温を維持することが運動パフォーマンス向上に重要である可能性が推察される(49)。

Edhlom らは 7 分間・70%HR_{max} の強度のランニングを実施する RW が後半開始直後の心拍数に与える影響を報告している(11)。後半開始前の心拍数は RW 試行で 117±10 拍/分、15 分間の安静を保つコントロール試行で 109±12 拍/分であり、RW 試行は有意に 7.3%の高値を示していたことを明らかにした(11)。また、後半の平均心拍数までの到達時間は RW 試行で 71±34 秒、コントロール試行で 129±44 秒であり、RW 試行が有意に早かったことを報告している(11)。

Edholm らは 1) 負荷が一定でない運動中の心拍数と VO₂、2) 反復スプリント能力の維持と酸素摂取動態の加速には正の相関関係があることから(7,10)、RW によって酸素摂取動態が加速し、間欠性スプリントパフォーマンスを維持できる可能性があることを示している(11)。一方で、RW 開始から後半開始直後 15 分間の VO₂を測定した Lovell らの研究では、RW 中の VO₂は安静を保つコントロール試行と比較し、RW 試行は有意な高値を示したが、サッカーを模した間欠性運動中の平均の VO₂は試行間で有意な差は認められなかったことを報告している(30)。同様の結果は心拍数にも認められた(30)。従って、RW が循環およびエネルギー代謝に与える影響は後半開始後の数分間で消滅することが推察される。実際に Edholm らが報告した後半の平均心拍数までの到達時間のコントロール、RW 試行間の際は 60 秒程度である。また、試合終了前および後の筋温、心拍数、糖・脂質代謝関連血中項目および脱水による体重減少率はコントロー

ル、RW 試行で試行間の差は認められていない(11,30,37,69)。従って RW が生理学的指標に与える影響は後半開始後数分間のみ残存し、試合終了前の生理学的指標には影響を与えないことが推察される。即ち、RW は生理学的指標から評価した追加的な疲労は引き起こさないことが考えられる。

第4項 ハーフタイム・リウォームアップの現状と課題

Russell らが報告したサッカーの試合におけるハーフタイム戦略の概要を図1-1 に示した(51)。スポーツやチーム戦略によって異なる可能性はあるものの、サッカー選手は控室への移動に約2分間を必要とするので、ハーフタイム戦略として使用できる時間は約13分間である(62)。13分間のハーフタイム戦略では、戦術ミーティング、医療および栄養学的サポートに多くの時間を消費し、それぞれ5~8分、3~5分であることが報告されている(62)。また、それ以外にはビデオ映像を使用したフィードバック、着衣・用具などの交換、選手の私的な準備などを実施している(62)。そして、後半開始直前に3分以内のRWを行っている(62)。しかし、Towlson らによると、RW を選手に実施させているイングランド・プレミアリーグ、チャンピオンシップのフィジカルコーチは58%にとどまっており、その理由として63%のフィジカルコーチがRWのための時間の不足を挙げている(62)。これまでに報告されている後半開始直後の運動パフォーマンスの低下を抑制するRWプロトコルの所要時間は5~10分間である一方、スポーツ現場でRWのために確保できる時間は3分以内であり、研究と応用に差異が存在する。また、主なRWを実施していない要因がRWのための時間の不足であることを考えると、より短時間のプロトコルを検討する必要がある。

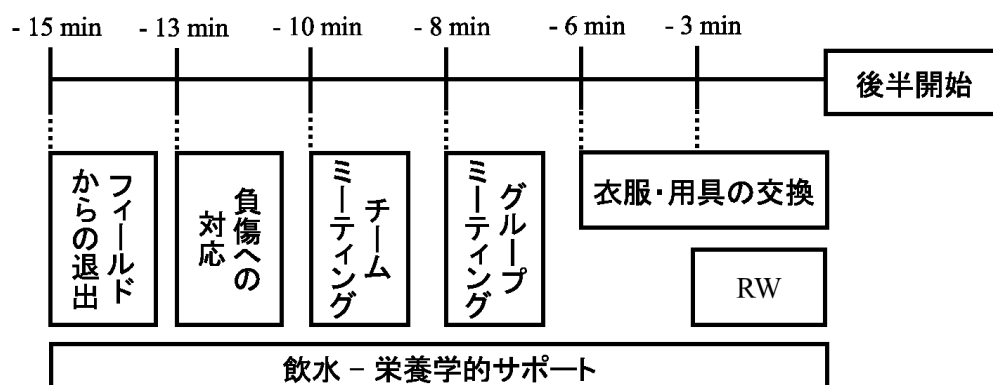


図 1-1 一般的なハーフタイム戦術の概要（Russell ら 2015 より改変）

RW re-warm up

第 3 節 本論文の目的および構成

先行研究で明らかにされているように 7 分間・中強度の *RW* は、いくつかの生理学的反応を引き起こすことによって、後半開始直後の運動パフォーマンスの維持に貢献する。しかし、これまでの先行研究による *RW* プロトコルは現場応用の観点から大きな問題があり、特に短時間で体温、代謝、筋活動のいずれかまたはすべてに対し生理学的変化を引き起こし、後半開始直後の運動パフォーマンスに寄与する *RW* プロトコルを検討する必要がある。

従って、本論文では球技系競技における後半開始直後の高強度運動パフォーマンスの維持もしくは向上に効果的な短時間の *RW* プロトコルおよび *RW* が高強度運動パフォーマンスに影響を与えるメカニズムを明らかにすることを目的とし、以下の 3 点の検討を行った。

- ① 異なる *RW* の運動時間が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響
(第 2 章)
- ② 異なる *RW* の運動強度が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響
(第 3 章)
- ③ エネルギー消費量を統一した異なる構成の *RW* が間欠性スプリントパフ

パフォーマンスに与える影響（第 4 章）

本論文は、第 2 章、第 3 章、第 4 章の 3 つの実験、総合考察（第 5 章）および結論（第 6 章）で構成されている。第 2 章、第 3 章および第 4 章の実験内容の概略は下記の通りである。

第 2 章：異なる RW の運動時間が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響

3 分間および 7 分間の 70% HR_{max} の強度でサイクリング運動を実施する RW が自転車運動で評価する間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。40 分間の間欠性自転車運動の後、異なる 3 条件（①15 分間の安静座位を保つコントロール試行、②7 分間・70% HR_{max} の強度のサイクリング運動を行う 7 min RW 試行、③3 分間・70% HR_{max} の強度のサイクリング運動を行う 3 min RW 試行）の 15 分間のハーフタイムを実施し、その後の間欠性スプリントパフォーマンスを評価した。また全身（呼気ガス分析）、末梢（近赤外線分光法による筋酸素動態）のエネルギー代謝を測定した。

第 3 章：異なる RW の運動強度が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響

30% VO_{2max} および 60% VO_{2max} の強度で 3 分間の自転車運動を実施する RW が自転車運動で評価する間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。第 2 章と同様の 40 分間の間欠性自転車運動の後、異なる 3 条件（①15 分間の安静座位を保つコントロール試行、②3 分間・60% VO_{2max} の強度でサイクリング運動を行う 60% RW 試行、③3 分間・30% VO_{2max} の強度でサイクリング運動を行う 30% RW 試行）の 15 分間のハーフタイムを実施し、その後の間欠性スプリントパフォーマンスを評価した。また第 2 章のエネルギー代謝に付け

加えて、外側広筋の筋活性および筋温を測定した。

第 4 章：エネルギー消費量を統一した異なる構成の RW が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響

同一エネルギー消費量であると概算される 3 分×30% VO_{2max} および 1 分×90% VO_{2max} の強度で自転車運動を実施する RW が自転車運動で評価する間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。第 2 章と同様の 40 分間の間欠性自転車運動の後、異なる 3 条件（①15 分間の安静座位を保つコントロール試行、②3 分間・30% VO_{2max} の強度でサイクリング運動を行う 3×30% RW 試行、③1 分間・90% VO_{2max} の強度でサイクリング運動を行う 1×90% RW 試行）の 15 分間のハーフタイムを実施し、その後の間欠性スプリントパフォーマンスを評価した。また第 2 章のエネルギー代謝、筋活性および筋温に付け加えて、深部体温を測定した。

本研究では、第 2 章から第 4 章までのすべての実験で運動負荷として自転車運動を用いた。この理由は、RW が高強度運動パフォーマンスに影響を与えるメカニズムをより正確に検討するためである。本研究の特徴の一つは、先行研究で検討されていない RW が代謝および筋活動に与える影響を検討したことである。特に筋酸素動態および筋活性は高強度運動パフォーマンスに大きな影響を与える要因であるため、RW がこの 2 つの項目に与える影響を示すことは非常に意義が高いと考える。走運動および自転車運動ともに、そのフォームが筋活動量に影響を与えることが報告されている。例えば走運動では接地の仕方や上体の前傾の有無によって(20,70)、自転車運動ではサドルの高さ、ハンドルの位置・形状、ペダルの形状によって(21)、筋活動量が変化する。従って、RW が高強度運動パフォーマンスに影響を与えるメカニズムを検討するには、被験者

内・間ともに運動のフォームを統一することが望ましい。しかし、走運動の際にフォームを統一することは難しい。本研究で用いた自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）はサドルの高さ、ハンドルの位置・形状、ペダルの形状を固定することが可能であり、筋活動を測定する際にフォームの統一の点で利点がある。また、筋活動量は筋酸素動態に影響を与えることが明らかにされており(34)、筋酸素動態の正確な測定にも繋がると考えられる。これらの理由より、本研究では自転車運動を用いた。自転車運動の使用に伴い、すべての実験で用いた 1 回目の 40 分の間欠性自転車運動はサッカー選手の試合の運動負荷(35)を参考に被験者全員が完遂可能なプロトコルを予備試験から決定した。

第 2 章

異なる RW の運動時間が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響

第 1 節 緒言

RW が後半開始直後の運動パフォーマンスを維持もしくは向上させることは、多くの先行研究によって報告されている(11,15,30,31,37,49,50,54,69,71)。しかし、これらの研究で用いられている RW プロトコルは 5~10 分間であり、実際のスポーツ現場ではハーフタイム中の時間的制約があることから、これらの RW プロトコルの実施は難しいことが指摘されている(51,62)。先行研究によると、実施の試合でハーフタイム中に RW のために確保できる時間は 3 分以内であることが明らかとなっており(62)、後半開始直後の運動パフォーマンスの維持に効果があると報告されてきた RW プロトコルの運動時間を短縮し、3 分間で RW を実施した場合でも後半開始直後の運動パフォーマンスを維持もしくは向上させるか明らかにする必要がある。

また、これまでの RW に関する先行研究の問題点の一つに運動パフォーマンスの評価方法が挙げられる。スプリントパフォーマンスを評価した先行研究の多くは、後半開始前および試合終了後にスプリントパフォーマンスを評価している(11,37)。唯一、後半中のスプリントパフォーマンスを評価している Lovell らの研究でも、15 分間に 3 回の測定である(29)。球技系競技の選手は一般的に 50~100 秒の休息を挟み、スプリントを反復しているため(8)、RW が後半のスプリントパフォーマンスに与える影響を検討する際は休息を挟みながらスプリントを繰り返す間欠性スプリントパフォーマンスを経時的に評価していく必要があると考えられる。

活動筋内の酸素利用性は、間欠性スプリントパフォーマンスの維持および向上に重要な要素の一つである。酸素利用性の向上は、スプリント中の ATP の再

合成などに寄与する好気性代謝の貢献度の上昇およびスプリント後の PCr の再合成を加速させることにより、間欠性スプリントパフォーマンスの維持および向上に寄与することが報告されている(14)。ウォーミングアップは、運動開始前の VO₂ のベースラインを高め、運動開始直後の VO₂ を向上させることが報告されている(4)。さらにウォーミングアップは、血管拡張および筋への血流量の増加によって、活動筋への酸素供給量を上昇させることが明らかとなっている(4)。RW が活動筋内の酸素動態に与える影響を検討した研究は報告されていないものの、Edholm らによると RW 後の数分間は安静を保った場合と比較し、心拍数が高いため、VO₂ も高値を示している可能性が示されている(11)。これに伴い、RW 後の数分間は活動筋の酸素利用性が高まっている可能性も考えられ、この上昇が間欠性スプリントパフォーマンスの維持もしくは向上に貢献している可能性が考えられる。

従って本研究は、異なる RW の運動時間、特に 3 分間の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響およびそのメカニズムの検討として、VO₂ および筋酸素動態に着目し、RW がそれらに与える影響も検討した。

第 2 節 方法

第 1 項 被験者

本研究は、1 回あたり 1 時間以上の運動を週 2 回以上行っている健康な若年成人男性 13 名を対象とした。被験者の身体特性は、年齢 22.4±2.1 歳、身長 1.72±0.05 m、体重 67.0±10.1 kg、VO_{2max} 48.1±4.1 ml/kg/min（平均±標準偏差）であった。被験者には、試験開始前に研究参加に関する説明を十分に実施し、書面にて研究参加に対する同意を得た。本研究は、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て、実施した（認証番号 2016-168）。

第 2 項 研究デザイン

本研究は、ハーフタイムの内容のみ異なる 3 試行の無作為化交差試験法を用いた。本試験では、15 分間のハーフタイムを挟む、40 分間の間欠性サイクリング運動を 2 回実施した。ハーフタイムの内容は、1) 15 分間の安静座位（コントロール試行）、2) 7 分間・70% HR_{max} の強度のサイクリングを行う RW (7 min RW 試行)、3) 3 分間・70% HR_{max} の強度のサイクリングを行う RW (3 min RW 試行) のいずれかとした。運動パフォーマンステストとしての 2 回目の間欠性運動は、Cycling Intermittent-Sprint Protocol (CISP) を用いた。CISP は、間欠性チームスポーツ選手の間欠性スプリントパフォーマンスを評価する運動パフォーマンステストであり、高い再現性が先行研究で認められている（級内相関係数[ICC] = 0.9) (17)。

また、生活習慣が結果に与える影響を考慮し、被験者は以下のことを指示された。

1. 実験期間中、生活習慣、運動、食事を通常の生活から変更しないこと。
2. 本試験前日の食事、間食及び摂取飲料を試行間で統一するため、被験者は 1 回目の本試験の前日に摂取したものを記録し、その後の試行で本試験の前日に同じものを摂取すること。
3. 本試験前 24 時間以内にカフェイン、アルコールを摂取しないこと。
4. 本試験 2 時間前から水以外の飲食を控えること。

さらに、本試験の測定項目に対する日内変動の影響を避けるため、3 試行はすべて同じ時間に開始した。本試験開始の 3 日以上前に、被験者は本試験の練習試技を実施した。3 試行の本試験は 3 日以上の間隔を空けて実施した。本試験中の気温および湿度は、それぞれ $20.7 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、 $50.3 \pm 2.5\%$ であった。

第3項 実験スケジュール

被験者は、最初に VO_{2max} および HR_{max} を測定するために自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）を用いた漸増負荷試験を実施した。漸増負荷試験は2つのステージに分かれており、1ステージ目は95 W から25 W ずつ増加させる3分×4回の最大下運動負荷試験であった。2ステージ目は1分ずつ25 W 増加させ、被験者を疲労困憊まで運動させる最大運動負荷試験であった。目標回転数は80 回/分とした。漸増負荷試験中、呼気ガス分析機（Quark CPET, COSMED, Rome, Italy）を用いて VO_2 を測定した。また、心拍計（Polar RCX3, Polar Electro, Kempele, Finland）を用い、心拍数を5秒ごとに測定した。

本試験のプロトコルを図 2-1 に示した。本試験はすべて自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）を用いた。被験者は5分間の安静を保った後、ウォーミングアップを実施した。ウォーミングアップは、95 W の負荷で5分間のサイクリングの後に30秒の休息を挟み、最後に120 W の負荷で30秒間のサイクリングを行うものとした。その後、5分間の休息を保ち、1回目の40分間の間欠性自転車運動を実施した。1回目の間欠性自転車運動は2分×20ステージの運動とし、2分間の内訳は15秒の安静座位、25秒の無負荷のサイクリング、10秒の高強度運動（130% VO_{2max} ）、70秒の中強度運動（60% VO_{2max} ）とした。サイクリングの目標回転数は80 回/分とした。1回目の間欠性自転車運動が終了した後、被験者は15分間のハーフタイムを実施した。ハーフタイムでは、1) 15分間の安静座位を保つコントロール試行、2) 7分間の安静座位の後に7分間のRWを70% HR_{max} の強度で行う7 min RW 試行、3) 11分間の安静座位の後に3分間のRWを70% HR_{max} の強度で行う3 min RW 試行のいずれかとした。RWは2回目の間欠性自転車運動の開始の1分前に終了した。RWの強度は、RWに関する多くの先行研究と同様に70% HR_{max} とした

(11,30,31,37,69)。ハーフタイム終了後、被験者は2回目の40分間の間欠性自転車運動を実施した。2回目の間欠性自転車運動は、CISPを用いた。CISPは2分×20ステージの運動であり、2分間の内訳は10秒の安静座位、体重の7.5%の重りを負荷した5秒のスプリント、105秒の50% VO_{2max} のアクティブリカバリーとした。5秒のスプリントは静止状態で右足のクランクが90度となる位置から開始した。105秒のアクティブリカバリー時の目標回転数は80回/分とした。1回目の間欠性自転車運動の強度を3試行で同一にするために1回目、2回目の間欠性自転車運動で異なる運動を用いた。

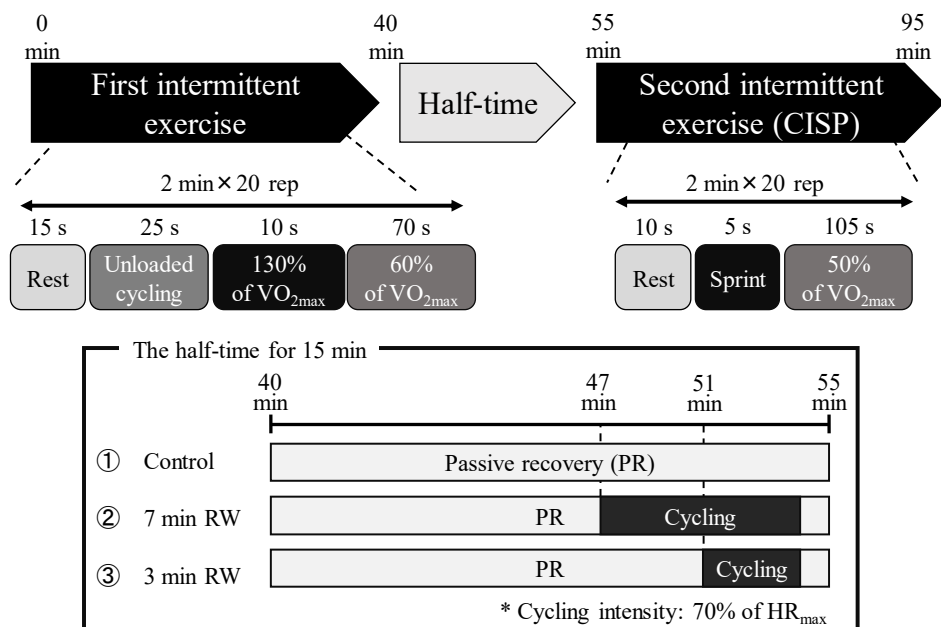


図 2-1 実験プロトコル

CISP The Cycling Intermittent-Sprint Protocol、Control 15 min of seated rest trial、7 min RW 7 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial、3 min RW 3 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial

第4項 測定項目

4-1. スプリントパフォーマンス

CISP 中の5秒間のスプリントの仕事量を、Anaerobic Test Software (Monark ATS

Software, Monark, Varberg, Sweden) を用いて測定した。仕事量はスプリントにおける平均パワー出力を秒数 (5 秒) で乗じることによって算出し、55-65 分、65-75 分、75-85 分、85-95 分間の平均仕事量を求めた。

4-2. 呼吸代謝

本試験における安静時から 65 分までの間、呼吸ガス分析機 (Quark CPET, COSMED, Rome, Italy) を用いて VO_2 、二酸化炭素排出量 (VCO_2)、呼吸交換比 (RER) を測定した。安静時 (pre)、0-40 分、54-55 分間ではそれぞれの平均値、55-65 分間では 10 秒ごとの平均値を算出した。また、RW 中の VO_2 の平均値も算出した。

4-3. 筋酸素動態

770 nm と 830 nm の 2 種類の波長を使用した空間分解近赤外線分光法 (NIR_{SRS} : Hb14, ASTEM, Kanagawa, Japan) を用いて、右脚外側広筋の筋腹部の筋酸素動態を 5 Hz で測定した。測定部位は、膝蓋骨と大転子間の 30% の長さの部位とし (59)、3 試行間で同じ部位から測定するために測定部位をサージカルマーカで記した。 NIR_{SRS} のプローブは 1 つの送光部と 2 つの受光部で形成されており、送光部と受光部の距離はそれぞれ 20 mm、30 mm であった。 NIR_{SRS} は、非侵襲的に酸化 (oxy-Hb)、脱酸化 (deoxy-Hb)、総ヘモグロビン濃度 (total-Hb) の安静時からの変化量 (Δ) および筋酸素飽和度 (SmO_2) を継続して測定することができる。本研究における安静は、ウォーミングアップ前の安静とし、pre、0-40 分、54-55 分間ではそれぞれの平均値、55-65 分間では 10 秒ごとの平均値を算出した。また、55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値も算出した。

NIR_{SRS} を用いる場合、測定部位の皮下脂肪厚は測定結果に大きな影響を与え

ることが明らかになっている(42)。近年の総説では皮下脂肪厚を測定することによって、得られた測定結果を補正できることが報告されている(43)。従って、本研究では本試験実施前に超音波装置（LogiQ3, GE Healthcare, Tokyo, Japan）を用いて、測定部位の皮下脂肪厚を測定し、脂肪補正ソフトウェア（Hb14, ASTEM, Kanagawa, Japan）を使用し、測定結果を補正した。皮下脂肪厚の被験者内変動係数は $5.5 \pm 4.9\%$ であった。

4-4. 心拍数および主観的運動強度

心拍数は、心拍計（Polar RCX3, Polar Electro, Kempele, Finland）を用いて、本試験を通して 5 秒間隔で測定した。pre、0-40 分、54-55 分、55-65 分、65-75 分、75-85 分、85-95 分間で平均心拍数を算出した。

主観的運動強度（RPE）は、ボルグスケールを用いて pre、40 分、55 分、65 分、75 分、85 分、95 分で測定した(6)。

第 5 項 統計解析

すべての値は平均値±標準偏差で示した。統計解析は統計分析ソフト（IBM SPSS Statistics Version 23.0, IBM Japan, Tokyo, Japan）を用いた。平均仕事量、 VO_2 、 VCO_2 、RER、 $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 、HR、RPE は、対応のある二元配置の分散分析を用い分析した。試行の主効果または試行と時間の交互作用が認められた場合、Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値は、対応のある一元配置の分散分析を用い分析した。試行の主効果が認められた場合 Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。平均仕事量とその他の測定項目の相関には、ピアソンの積率相関係数を用いた。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。

第3節 結果

第1項 間欠性スプリントパフォーマンス

CISP におけるスプリント中の平均仕事量を図 2-2a に示した。コントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の 55-65 分間における平均仕事量は、それぞれ 3638 ± 906 J、 3808 ± 949 J、 3827 ± 960 J であった。7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。7 min RW 試行、3 min RW 試行間には有意な差は認められなかった。65-75 分、75-85 分、85-95 分間の平均仕事量には、試行間の差は認められなかった。

55-65 分間における平均仕事量と 55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の間には正の相関関係が認められた ($r = 0.52$, $p < 0.05$, $n = 39$) (図 2-2b)。

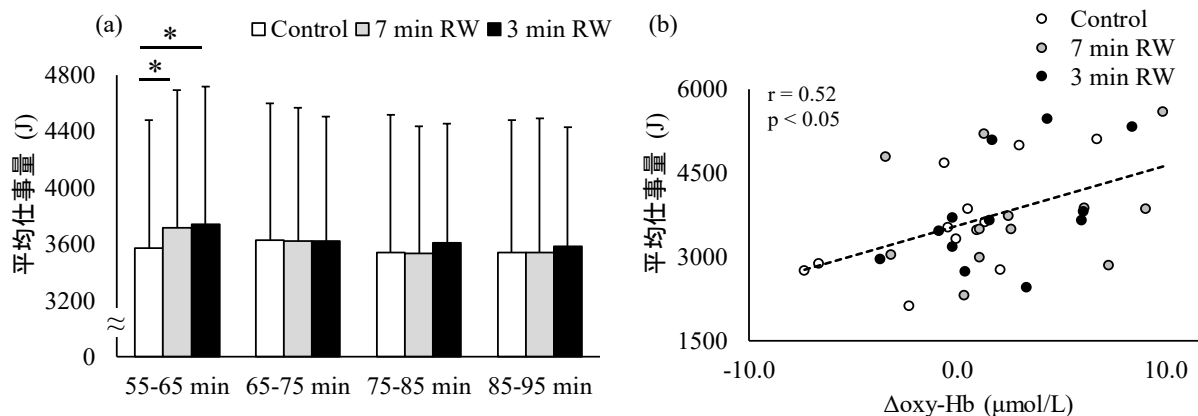


図 2-2 各測定ポイントにおける平均仕事量 (a) および 55-65 分における平均仕事量と CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の相関 (b) $n=13$ 、平均値 \pm 標準偏差、対応のある二元配置の分散分析 (a)、ピアソンの積率相関係数 (b)

Control 15 min of seated rest trial、*7 min RW* 7 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial、*3 min RW* 3 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial

平均仕事量：試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* vs コントロール試行 $p < 0.05$

第 2 項 呼吸代謝

pre、0-40 分、54-55 分間における VO_2 、 VCO_2 、RER を表 2-1 に示した。pre、0-40 分における VO_2 、 VCO_2 、RER は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における 7 min RW 試行、3 min RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し ($p < 0.05$)、7 min RW 試行は 3 min RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。54-55 分間における 7 min RW 試行、3 min RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し ($p < 0.05$)、7 min RW 試行は 3 min RW 試行と比較し、高値を示す傾向が認められた ($p = 0.08$)。54-55 分間における 7 min RW 試行の RER はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

		Control	7 min RW	3 min RW	p value
VO ₂ (ml/kg/min)	Pre	5.5 ± 0.9	5.6 ± 0.8	5.4 ± 0.6	Trial < 0.05
	0-40 min	28.4 ± 3.2	28.1 ± 3.5	28.8 ± 3.5	Time < 0.05
	54-55 min	7.1 ± 1.0	18.8 ± 3.1 [*]	18.0 ± 2.7 ^{*†}	Interaction < 0.05
VCO ₂ (ml/kg/min)	Pre	4.9 ± 0.8	5.0 ± 0.7	4.8 ± 0.5	Trial < 0.05
	0-40 min	27.2 ± 3.1	26.9 ± 3.5	27.5 ± 3.6	Time < 0.05
	54-55 min	6.6 ± 1.5	18.6 ± 3.5 [*]	17.6 ± 3.2 ^{*(†)}	Interaction < 0.05
RER (A.U.)	Pre	0.88 ± 0.03	0.88 ± 0.04	0.88 ± 0.05	Trial > 0.05
	0-40 min	0.95 ± 0.03	0.95 ± 0.02	0.95 ± 0.03	Time < 0.05
	54-55 min	0.90 ± 0.07	0.97 ± 0.05 [*]	0.96 ± 0.07	Interaction < 0.05
HR (%HR _{max})	Pre	36 ± 5	36 ± 4	36 ± 4	Trial < 0.05
	0-40 min	71 ± 5	70 ± 6	71 ± 4	
	54-55 min	48 ± 5	66 ± 8 [*]	63 ± 6 [*]	
	55-65 min	70 ± 4	74 ± 6 ^(*)	74 ± 4 [*]	Time < 0.05
	65-75 min	76 ± 5	78 ± 6	79 ± 4	Interaction < 0.05
	75-85 min	78 ± 5	80 ± 6	81 ± 4	
	85-95 min	80 ± 5	81 ± 6	82 ± 5	
RPE (A.U.)	Pre	6.3 ± 0.6	6.4 ± 0.7	6.2 ± 0.4	Trial < 0.05
	40 min	12.6 ± 2	12.6 ± 1.9	11.9 ± 1.8	
	55 min	8.2 ± 1.7	11.8 ± 1.7 [*]	10.8 ± 1.5 ^{*†}	
	65 min	12.2 ± 1.5	13.2 ± 1.2 [*]	12.8 ± 1.3	Time < 0.05
	75 min	13.2 ± 1.8	14.2 ± 1.6	14.1 ± 1.6	Interaction < 0.05
	85 min	14.2 ± 1.9	15.1 ± 1.8	14.8 ± 1.5	
	95 min	14.9 ± 2.2	15.8 ± 2.2	15.5 ± 2.2	

表 2-1 各測定ポイントにおける呼気代謝、心拍数および主観的運動強度

n=13、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*7 min RW* 7 min of the cycling at 70% of HR_{max}

trial、*3 min RW* 3 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial、*VO₂* oxygen uptake、*VCO₂*

carbon dioxide production、*RER* respiratory exchange ratio、*HR* heart rate、*RPE* rating

of perceived exertion

^{*} vs コントロール試行 p < 0.05

^(*) vs コントロール試行 0.1 > p > 0.05

[†] vs 7 min RW 試行 p < 0.05

(†) vs 7 min RW 試行 $0.1 > p > 0.05$

55-65 分間における 10 秒ごとの VO_2 、 VCO_2 、 RER を図 2-3 に示した。55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の VO_2 の平均値は、それぞれ 29.1 ± 2.3 ml/kg/min、 30.3 ± 2.6 ml/kg/min、 30.6 ± 2.1 ml/kg/min であった。7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 55 分 40 秒および 59 分 30 秒から 50 秒における 7 min RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、55 分 0 秒から 55 分 40 秒、57 分 30 秒から 57 分 50 秒および 59 分 30 秒から 50 秒における 3 min RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 2-3a)。

55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の VCO_2 の平均値は、それぞれ 26.5 ± 2.6 ml/kg/min、 28.5 ± 3.0 ml/kg/min、 29.0 ± 2.6 ml/kg/min であった。7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 56 分 0 秒および 57 分 30 秒から 50 秒における 7 min RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、55 分 0 秒から 56 分 0 秒、57 分 30 秒から 50 秒および 59 分 40 秒から 60 分 0 秒における 3 min RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 2-3b)。

55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の RER の平均値は、それぞれ 0.91 ± 0.05 A.U.、 0.94 ± 0.05 A.U.、 0.95 ± 0.05 A.U. であった。7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 57 分 0 秒および 57 分 30 秒から 58 分 30 秒における 7 min RW 試行および 3 min RW 試行の RER はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 2-3c)。

RW 中における VO_2 は 7 min RW 試行および 3 min RW 試行でそれぞれ 29.1 ± 4.6 ml/kg/min、 26.8 ± 4.1 ml/kg/min であった。それらはそれぞれ $\text{VO}_{2\text{max}}$ の 60.3

±6.9%、55.6±5.6%に相当した。

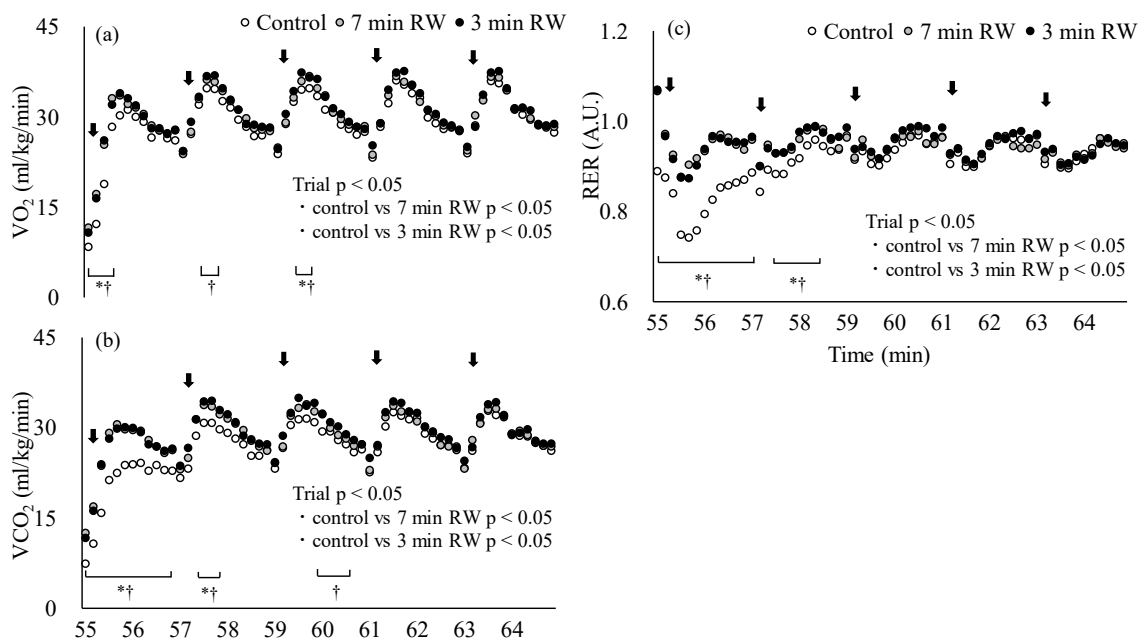


図 2-3 55-65 分における 10 秒ごとの酸素摂取量 (a)、二酸化炭素排出量 (b)、呼吸交換比 (c)

n=13、平均値、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*7 min RW* 7 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial、*3 min RW* 3 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial

エラーバーは明快さのために省略した。矢印は CISP 中のスプリントを示す。

VO_2 : 試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

VCO_2 : 試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

RER : 試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs 7 min RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs 3 min RW 試行 $p < 0.05$

第3項 筋酸素動態

pre、0-40 分、54-55 分間における $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 を表 2-2 に示した。pre、0-40 分における $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における 7 min RW 試行、3 min RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ および SmO_2 はコントロール試行と比較し、それぞれ有意な高値、有意な低値を示した ($p < 0.05$)。

表 2-2 各測定ポイントにおける筋酸素動態

		Control	7 min RW	3 min RW	p value
	Pre	-	-	-	Trial > 0.05
$\Delta\text{oxy-Hb}$ ($\mu\text{mol/L}$)	0-40 min	-2.5 ± 3.7	-0.6 ± 6.8	0.1 ± 3.5	Time < 0.05
	54-55 min	10.5 ± 5.7	9.3 ± 5.5	11.6 ± 4.4	Interaction > 0.05
	Pre	-	-	-	Trial < 0.05
$\Delta\text{deoxy-Hb}$ ($\mu\text{mol/L}$)	0-40 min	7.0 ± 3.7	7.1 ± 3.8	7.8 ± 3.5	Time < 0.05
	54-55 min	-5.2 ± 2.2	$1.9 \pm 2.8^*$	$1.9 \pm 2.6^*$	Interaction < 0.05
	Pre	-	-	-	Trial < 0.05
$\Delta\text{total-Hb}$ ($\mu\text{mol/L}$)	0-40 min	4.4 ± 3.8	5.8 ± 6.3	7.9 ± 2.8	Time < 0.05
	54-55 min	5.4 ± 6.6	11.1 ± 6.5	13.4 ± 5.8	Interaction > 0.05
	Pre	67.6 ± 4.5	66.5 ± 4.4	66.4 ± 4.8	Trial < 0.05
SmO_2 (%)	0-40 min	60.3 ± 5.5	59.7 ± 5.0	59.6 ± 6.4	Time < 0.05
	54-55 min	76.9 ± 5.7	$69.4 \pm 5.1^*$	$69.4 \pm 4.7^*$	Interaction < 0.05

n=13、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*7 min RW* 7 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial、*3 min RW* 3 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial

* vs コントロール試行 $p < 0.05$

55-65 分間における 10 秒ごとの $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 を図 2-4 に示した。55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW

試行の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値は、それぞれ $0.5 \pm 3.6 \mu\text{mol/L}$ 、 $2.5 \pm 4.0 \mu\text{mol/L}$ 、 $3.0 \pm 3.5 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 30 秒から 56 分 10 秒および 56 分 50 秒から 57 分 0 秒における 7 min RW 試行の $\Delta\text{oxy-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、55 分 0 秒から 57 分 0 秒、57 分 40 秒から 58 分 40 秒および 59 分 30 秒から 60 分 30 秒における 3 min RW 試行の $\Delta\text{oxy-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 2-4a)。55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ は、コントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行でそれぞれ $0.1 \pm 3.8 \mu\text{mol/L}$ 、 $2.8 \pm 4.1 \mu\text{mol/L}$ 、 $2.6 \pm 3.7 \mu\text{mol/L}$ であった。7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ の平均値は、それぞれ $6.5 \pm 3.5 \mu\text{mol/L}$ 、 $7.6 \pm 4.3 \mu\text{mol/L}$ 、 $7.2 \pm 3.9 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 0 秒から 55 分 20 秒における 7 min RW 試行および 3 min RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 2-4b)。

55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の $\Delta\text{total-Hb}$ の平均値は、それぞれ $6.9 \pm 4.8 \mu\text{mol/L}$ 、 $9.9 \pm 5.2 \mu\text{mol/L}$ 、 $10.2 \pm 4.0 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 10 秒から 55 分 20 秒における 7 min RW 試行の $\Delta\text{total-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 2-4c)。55-65 分間におけるコントロール試行、7 min RW 試行、3 min RW 試行の SmO_2 の平均値は、それぞれ $62.0 \pm 5.3 \%$ 、 $60.8 \pm 6.5 \%$ 、 $61.4 \pm 6.2 \%$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 0 秒から 55 分 10 秒における 7 min RW 試行の SmO_2 はコントロール試行と比較し有意な低値を示し ($p < 0.05$)、55 分 0 秒から 55 分 20 秒における 3 min RW 試行の SmO_2 はコントロール試行と比較し有意な低値を示した ($p < 0.05$) (図 2-4d)。

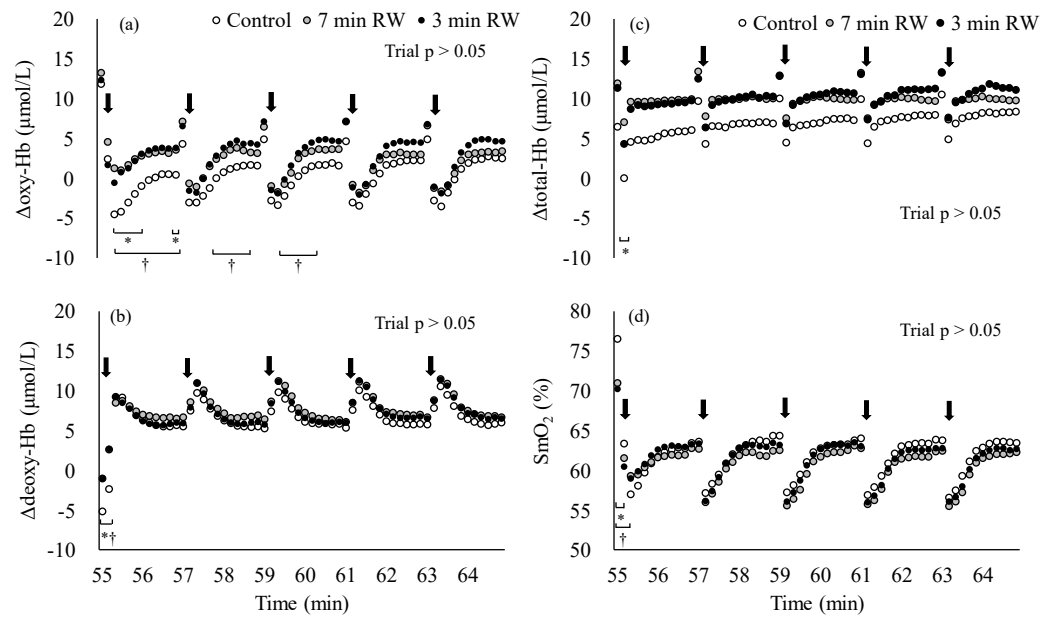


図 2-4 55-65 分における 10 秒ごとの酸化ヘモグロビン濃度 (a)、脱酸化ヘモグロビン濃度 (b)、総ヘモグロビン濃度 (c) の安静時からの変化量および筋酸素飽和度 (d)

n=13、平均値、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*7 min RW* 7 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial、*3 min RW* 3 min of the cycling at 70% of HR_{max} trial

エラーバーは明快さのために省略した。矢印は CISP 中のスプリントを示す。

$\Delta oxy-Hb$: 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

$\Delta deoxy-Hb$: 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

$\Delta total-Hb$: 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

SmO_2 : 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs 7 min RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs 3 min RW 試行 $p < 0.05$

第 4 項 心拍数および主観的運動強度

各測定ポイントにおける平均心拍数を表 2-1 に示した。pre、0-40 分、65-75

分、75-85 分、85-95 分間における平均心拍数は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における 7 min RW 試行、3 min RW 試行の平均心拍数はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55-65 分間における 7 min RW 試行の平均心拍数はコントロール試行と比較し高値を示す傾向が認められ ($p = 0.06$)、3 min RW 試行の平均心拍数はコントロール試行と比較し高値を示した ($p < 0.05$)。

各測定ポイントにおける RPE を表 2-1 に示した。55 分における 7 min RW 試行、3 min RW 試行の RPE はコントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、7 min RW 試行の RPE は 3 min RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。65 分における 7 min RW 試行の RPE はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

第 4 節 考察

我々の知る限り、本研究は異なる時間の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した初めての研究である。本研究の結果、3 min RW および 7 min RW 試行はコントロール試行と比較し、55-65 分間のスプリントの平均仕事量を向上させることを明らかにした。また、コントロール試行と比較した 3 min RW、7 min RW 試行の平均仕事量の上昇率はそれぞれ 4.7% および 4.1% でほぼ同様であった。それらの値は先行研究で報告されている RW のスプリントパフォーマンス向上効果とほぼ同様であった (Lovell ら 2013: 5.0%(30)、Mohr ら 2004: 4.0%(37))。従って、3 分間実施する RW は 7 分間実施する同強度の RW とほぼ同様の後半開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有している可能性が示唆された。また、55 分における 3 min RW 試行の RPE は 7 min RW 試行と比較し、有意な低値を示した。これは、3 min RW を実施するために要する尽力は 7 min RW と比較し低いことを示しており、

すなわち 3 min RW は 7 min RW よりも主観的な観点から実施しやすい可能性を示している。また Towlson らが指摘しているように先行研究および本研究で用いられている 5-7 分間の運動時間を要する RW は、時間的制約のため実際の試合での実施は難しい(62)。実際の試合において RW のために確保できる時間は、3 分間程度である可能性が指摘されている(62)。従って、7 min RW とほぼ同様の運動パフォーマンス向上効果を有しており、主観的および時間的制約の観点から応用がより容易であると考えられる 3 min RW は後半開始直後の運動パフォーマンスを向上させるためのハーフタイム戦術の一つとして用いられる可能性がある。

本研究では、RW がその後の筋酸素動態に与える影響を検討した。特に活動筋における酸素利用性は間欠性スプリントパフォーマンスを維持もしくは向上させるための重要な要因の一つである(13)。活動筋における酸素利用性を向上させることは、スプリントなどの高強度運動で減少した PCr の再合成を促進させ、その再合成率はその後のスプリントパフォーマンスと強く関係していることが報告されている(16,32,56)。本研究の結果、7 min RW 試行、3 min RW 試行は 55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ をコントロール試行と比較し向上させ、また 55-65 分間の 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ と 55-65 分間の平均仕事量の間には正の相関関係があることが明らかとなった。本研究では PCr の再合成について測定を実施していないものの、本研究の結果から RW はスプリント後に活動筋の酸素利用性を向上させることによって PCr の再合成に貢献していた可能性が考えられる。この結果は、中強度のウォームアップが筋代謝に与える影響を検討した Takizawa らの報告と同様の結果であった(60)。

7 min RW 試行、3 min RW 試行において 55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ が高値を示したメカニズムとして、活動筋

への酸素供給が向上した可能性が考えられる。 oxy-Hb は、活動筋への酸素供給と消費のバランスを反映する(58)。活動筋での酸素消費に着目すると、7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較しスプリントの仕事量が高値を示していること、活動筋での酸素の抜き取りと活動筋からの血液の流出を反映する $\Delta\text{deoxy-Hb}$ が試行間で有意な差が認められないことから、酸素消費が 7 min RW 試行、3 min RW 試行でコントロール試行と比較し高いことは考えづらい(58)。一方、先行研究によるとウォーミングアップはその後の主運動中における血管拡張および筋血流量の増加により活動筋への酸素供給を向上させることが報告されている(4,22)。実際に Takizawa らはウォーミングアップ後の活動筋への筋血流の増加および体温上昇による酸素解離曲線の右傾化によって、主運動中の活動筋における相対的な oxy-Hb 濃度が上昇したことを明らかにしている(60)。従って、本研究においても同様のメカニズムで 7 min RW 試行、3 min RW 試行はコントロール試行と比較し、アクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ を向上させた可能性が考えられる。

本研究の結果から 54-55 分、55-65 分における VO_2 はコントロール試行と比較し、7 min RW 試行、3 min RW 試行で有意な高値を示した。54-55 分における酸素摂取が 7 min RW 試行、3 min RW 試行で高値を示したことは、運動開始前の VO_2 のベースラインを向上させたことを示している。運動開始前の VO_2 のベースラインの向上は、運動開始後の酸素負債を減少させ、持久性運動パフォーマンスを向上させる可能性があることが報告されている(5)。実際に CISP 開始直後の VO_2 は、7 min RW 試行、3 min RW 試行でコントロール試行と比較し高値を示している。本研究では、持久性運動パフォーマンスを評価していないが、先行研究では RW は持久性運動パフォーマンスが向上させることが明らかとなっている(31,69)。従って、本研究で用いた 7 min RW、3 min RW は後半開始直後の VO_2 を向上させることによって、持久性運動パフォーマンスの向上に寄与

する可能性がある。55-65 分における VO_2 がコントロール試行と比較し 7 min RW 試行、3 min RW 試行で有意な高値を示したメカニズムは、ベースライン VO_2 の上昇以外に代謝産物を除去するために酸素利用の需要が高まっていた可能性が考えられる。 VO_2 は PCr の再合成、乳酸の代謝、蓄積されたリン酸塩の除去のため、高強度運動後に高値を示すことが報告されている(14)。本研究では、55-65 分におけるスプリントの仕事量はコントロール試行と比較し、7 min RW 試行、3 min RW 試行で有意な高値を示している。従って、7 min RW 試行、3 min RW 試行ではスプリント後の代謝産物の除去のために用いられる VO_2 がコントロール試行よりも高かった可能性が考えられる。

VO_2 と同様に VCO_2 、RER も 55-65 分において、コントロール試行と比較し 7 min RW 試行、3 min RW 試行で有意な高値を示した。これは、間欠性スプリントパフォーマンスが 7 min RW 試行、3 min RW 試行で高値を示したことに起因しており、嫌気性代謝および水素イオンの蓄積が 7 min RW 試行、3 min RW 試行で高まっていた可能性が考えられる。高強度運動後はアシドーシスを予防するために水素イオンが除去されるが、そのためには炭酸水素ナトリウムおよび CO_2 が用いられる。従って、間欠性スプリントパフォーマンスが高まったことによって嫌気性代謝が亢進し、水素イオンが産生されたことによって、 VCO_2 、RER も 55-65 分において、コントロール試行と比較し 7 min RW 試行、3 min RW 試行で有意な高値を示した可能性がある。

本研究の独創的な点の一つに、運動パフォーマンステストとして球技系競技の選手の運動形態と類似した CISP を用いたことが挙げられる(8)。先行研究では、スプリントパフォーマンスの評価を後半開始直前と試合終了直後に実施しており、RW の運動パフォーマンス向上効果がどの程度持続するのか不明であった。本研究では RW 後 40 分間継続してスプリントパフォーマンスを評価し、スプリントパフォーマンスの向上効果は後半開始後 10 分間維持されることを

明らかにした。また本研究では、呼気代謝および筋酸素動態を測定した。RW に関する先行研究では、呼気代謝と筋酸素動態を同時に測定した報告はない。本研究の結果、RW は 55-65 分間における VO_2 、 VCO_2 、RER、スプリント後の $\Delta oxy-Hb$ を向上させることを明らかにした。好気性代謝は 60 秒以内の短い休息でスプリントを反復する反復スプリント能力の維持に重要な要因の一つである(13)。好気性代謝はスプリントを反復する場合に全体のエネルギー供給の 40% を占めることが報告されている(13)。また、スプリント後の酸素利用性の向上は、スプリント後の PCr の再合成を加速させる(16,32)。従って、本研究は RW が後半開始後のエネルギー代謝の調整に重要な役割を担っている可能性を明らかにした。

第 5 節 結論

本研究は、異なる RW の運動時間、特に 3 分間の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。その結果、3 分間実施する RW、7 分間実施する RW は、安静を保った状態と比較し後半開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させ、3 分間実施する RW は 7 分間実施する RW と同等の後半開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有することが明らかになった。また、3 分間および 7 分間実施する RW は後半開始時のベースライン VO_2 、後半開始後 10 分間の VO_2 、後半開始直後におけるスプリント後の $\Delta oxy-Hb$ を向上させる可能性があることを明らかにした。本研究の結果は、7 分間の RW と比較し、時間の短い 3 分間の RW が間欠性スプリントパフォーマンス、エネルギー代謝の亢進およびスプリント後の酸素利用性の向上のためにハーフタイム戦術の一つとして有効である可能性を示している。

第 3 章

異なる RW の運動強度が間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響

第 1 節 緒言

第 2 章より先行研究で用いられてきた RW よりも短時間である 3 分間・70% HR_{max} の強度の RW は、その後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させることが明らかになった。しかし、これまでの先行研究では RW 中の運動強度に着目し、その強弱が後半の運動パフォーマンスに与える影響を検討した報告はない。一方、主運動前のウォーミングアップの強度とその後の運動パフォーマンスを検討した先行研究によると、スプリント、間欠性スプリントパフォーマンスを向上させるためには、PCr の低下を引き起こさず、筋温を上昇させる低・中強度のウォーミングアップが適切であることが報告されている(5,33)。実際に Sargeant らは、39% VO_{2max} の低強度のウォーミングアップは 56% VO_{2max} 、74% VO_{2max} 、80% VO_{2max} の中、高強度のウォーミングアップと比較し、その後のサイクリングスプリントパフォーマンスを向上させたことを明らかにしている(53)。同様に Wittekind らは、40% peak aerobic power の低強度のウォーミングアップは 110% peak aerobic power の高強度のウォーミングアップよりその後のサイクリングスプリントパフォーマンスの向上に寄与することを報告している(65)。これらに代表される主運動前のウォーミングアップ効果に関する研究結果を踏まえて、これまでの RW に関する先行研究では 70% HR_{max} の中強度の運動が多く用いられており、中強度の RW がその後の運動パフォーマンスに与える影響は明らかである(11,30,31,37,49,68,69,71)。しかし、低強度の RW が低強度のウォーミングアップと同様にその後のスプリントパフォーマンスを向上させるか明らかではない。

従って、本研究の目的は異なる RW の運動強度、特に低強度の RW がその後

の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響およびそのメカニズムの検討として、筋活動および筋温に着目し、RW がそれらに与える影響も検討した。

第 2 節 方法

第 1 項 被験者

本研究は、1 回あたり 1 時間以上の運動を週 2 回以上行っている健康な若年成人男性 11 名を対象とした。被験者の身体特性は、年齢 22.7 ± 2.4 歳、身長 1.73 ± 0.06 m、体重 65.3 ± 10.0 kg、 VO_{2max} 52.6 ± 6.2 ml/kg/min（平均 \pm 標準偏差）であった。被験者には、試験開始前に研究参加に関する説明を十分に実施し、書面にて研究参加に対する同意を得た。本研究は、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て、実施した（認証番号 2017-048）。

第 2 項 研究デザイン

本研究は、ハーフタイムの内容のみ異なる 3 試行の無作為化交差試験法を用いた。本試験では、15 分間のハーフタイムを挟み 2 回の間欠性サイクリング運動を 2 回実施した。ハーフタイムの内容は、1) 15 分間の安静座位（コントロール試行）、2) 3 分間・60% VO_{2max} の強度のサイクリングを行う RW（60% RW 試行）、3) 3 分間・30% VO_{2max} の強度のサイクリングを行う RW（30% RW 試行）のいずれかとした。運動パフォーマンステストとしての 2 回目の間欠性運動は、CISP を用いた。第 2 章より RW は後半開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させるため、2 回目の間欠性サイクリング運動は 10 分間とした。

また、生活習慣が結果に与える影響を考慮し、第 2 章に準じて禁止事項を指示した。

さらに、本試験の測定項目に対する日内変動の影響を避けるため、3 試行は

すべて同じ時間に開始した。本試験開始の3日以上前に、被験者は本試験の練習試技を実施した。3試行の本試験は3日以上の間隔を空けて実施した。本試験中の気温および湿度は、それぞれ $20.6 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $50.8 \pm 1.4\%$ であった。

第3項 実験スケジュール

被験者は、最初に $\text{VO}_{2\text{max}}$ および HR_{max} を測定するために自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）を用いた漸増負荷試験を実施した。漸増負荷試験は40Wの負荷から開始し、2分毎に40W増加させ、被験者が疲労困憊となるまで実施した。目標回転数は80回/分とした。漸増負荷試験中、呼気ガス分析機（Quark CPET, COSMED, Rome, Italy）を用いて VO_2 を測定した。また、心拍計（Polar RCX3, Polar Electro, Kempele, Finland）を用い、心拍数を5秒ごとに測定した。

本試験のプロトコルを図3-1に示した。ウォーミングアップおよび1回目の間欠性サイクリング運動は第2章と同様とした。本試験はすべて自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）を用いた。被験者は5分間の安静を保った後、ウォーミングアップを実施した。ウォーミングアップは、95 Wの負荷で5分間のサイクリングの後に30秒の休息を挟み、最後に120 Wの負荷で30秒間のサイクリングを行うものとした。その後、5分間の休息を保ち、1回目の40分間の間欠性自転車運動を実施した。1回目の間欠性自転車運動は2分×20ステージの運動とし、2分間の内訳は15秒の安静座位、25秒の無負荷のサイクリング、10秒の高強度運動（ $130\% \text{VO}_{2\text{max}}$ ）、70秒の中強度運動（ $60\% \text{VO}_{2\text{max}}$ ）とした。サイクリングの目標回転数は80回/分とした。1回目の間欠性自転車運動が終了した後、被験者は15分間のハーフタイムを実施した。ハーフタイムでは、1) 15分間の安静座位を保つコントロール試行、2) 11分間の安静座位の後に3分間のRWを $60\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度で行う60% RW試行、3) 11

分間の安静座位の後に3分間のRWを30% VO_{2max} の強度で行う30% RW試行のいずれかとした。RWは2回目の間欠性自転車運動の開始の1分前に終了した。60% RW試行の強度は、第2章で得られたRW中の VO_2 から設定し、30% RW試行はその半分の強度とした。ハーフタイム終了後、被験者は2回目の10分間の間欠性自転車運動を実施した。2回目の間欠性自転車運動は、CISPを用いた。CISPは2分×5ステージの運動とし、2分間の内訳は10秒の安静座位、体重の7.5%の重りを負荷した5秒のスプリント、105秒の50% VO_{2max} のアクティブリカバリーとした。5秒のスプリントは静止状態で右足のクランクが90度となる位置から開始した。105秒のアクティブリカバリー時の目標回転数は80回/分とした。

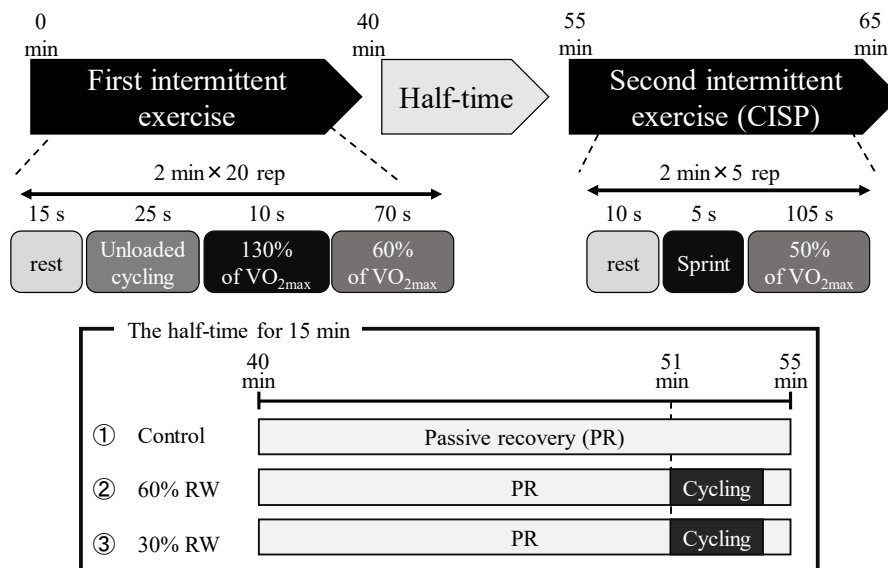


図 3-1 実験プロトコル

CISP The Cycling Intermittent-Sprint Protocol、*Control* 15 min of seated rest trial、*60% RW* 3 min of the cycling at 60% of VO_{2max} trial、*30% RW* 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial

第4項 測定項目

4-1. スプリントパフォーマンス

CISP 中の 5 秒間のスプリントの仕事量を、Anaerobic Test Software (Monark ATS Software, Monark, Varberg, Sweden) を用いて測定した。仕事量はスプリントにおける平均パワー出力を秒数 (5 秒) で乗じることによって算出し、55-65 分間の平均仕事量を求めた。

4-2. 筋電図

CISP における右脚外側広筋の筋腹部の筋活動を表面筋電図 (SX230-1000, Biometrics, Newport, United Kingdom) を用いて測定した。サンプリング周波数は 1000 Hz とし、アース電極は左手首に装着した。皮膚抵抗を低減させるため ($< 2 \text{ k}\Omega$)、電極を貼り付ける前に皮膚に鑢を掛け、アルコールで洗浄した。測定部位は、膝蓋骨と大転子間の 30% の長さの部位とし、3 試行間で同じ部位から測定するために測定部位をサージカルマーカで記した。スプリント中のバーストの開始から終了までの二乗平均平方根 (RMS) を算出し、55-65 分間の平均値を求めた。バーストの開始は、 $\pm 0.2 \text{ mV}$ の電気閾値を用い定義した(44)。筋電図の正規化のために 3 秒間の徒手抵抗による最大随意収縮 (MVC) を本試験開始前に実施した。100% MVC 値は 3 秒間の MVC 中の 1 秒間を使用し、得られた値を用い正規化した。

4-3. 推定筋温

本試験における pre から 65 分までの間、右脚外側広筋の筋腹部の皮膚温を測定し、皮膚温から推定した筋温を算出した。推定筋温の算出のために先行研究で用いられている公式 (筋温 = 皮膚温 $\times 1.02 + 0.89$) を用いた(48)。皮膚温の測定には、サーミスター温度計を用いた (ITP082-24, Nikkiso-therm, Tokyo,

Japan)。pre、40 分、55 分、60 分、65 分の平均値を算出した。

4-4. 呼吸代謝

本試験における安静時から 65 分までの間、呼吸ガス分析機（Quark CPET, COSMED, Rome, Italy）を用いて VO_2 、 VCO_2 、RER を測定した。pre、0-40 分、54-55 分間ではそれぞれの平均値、55-65 分間では 10 秒ごとの平均値を算出した。

4-5. 筋酸素動態

770 nm と 830 nm の 2 種類の波長を使用した NIR_{SRS} (Hb14, ASTEM, Kanagawa, Japan) を用いて、右脚外側広筋の筋腹部の筋酸素動態を 5 Hz で測定した。 NIR_{SRS} のプローブは 1 つの送光部と 2 つの受光部で形成されており、送光部と受光部の距離はそれぞれ 20 mm、30 mm であった。 NIR_{SRS} は、非侵襲的に oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb の安静時からの Δ および SmO_2 を継続して測定することができる。測定用プローブは表面筋電図の電極と隣接させた。本研究における安静は、ウォーミングアップ前の安静とし、pre、0-40 分、54-55 分間ではそれぞれの平均値、55-65 分間では 10 秒ごとの平均値を算出した。また、55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値も算出した。

NIR_{SRS} を用いる場合、測定部位の皮下脂肪厚は測定結果に大きな影響を与えることが明らかにされている(42)。近年の総説では皮下脂肪厚を測定することによって、得られた測定結果を補正できることが報告されている(43)。従って、本研究では本試験実施前に超音波装置（LogiQ3, GE Healthcare, Tokyo, Japan）を用いて、測定部位の皮下脂肪厚を測定し、脂肪補正ソフトウェア（Hb14, ASTEM, Kanagawa, Japan）を使用し、測定結果を補正した。皮下脂肪厚の被験

者内変動係数は $4.2 \pm 3.5\%$ であった。

4-6. 心拍数および主観的運動強度

心拍数は、心拍計（Polar RCX3, Polar Electro, Kempele, Finland）を用いて、本試験を通して 5 秒間隔で測定した。pre、0-40 分、54-55 分、55-65 分間で平均心拍数を算出した。

RPE は、ボルグスケールを用いて pre、40 分、55 分、60 分、65 分で測定した(6)。

第 5 項 統計解析

すべての値は平均値±標準偏差で示した。統計解析は統計分析ソフト（IBM SPSS Statistics Version 24.0, IBM Japan, Tokyo, Japan）を用いた。推定筋温、 VO_2 、 VCO_2 、RER、 $\Delta oxy-Hb$ 、 $\Delta deoxy-Hb$ 、 $\Delta total-Hb$ 、 SmO_2 、HR、RPE は、対応のある二元配置の分散分析を用い分析した。試行の主効果または試行と時間の交互作用が認められた場合、Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。55-65 分間の平均仕事量、RMS および 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta oxy-Hb$ の平均値は、対応のある一元配置の分散分析を用い分析した。試行の主効果が認められた場合 Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。RMS、 $\Delta oxy-Hb$ 、 $\Delta deoxy-Hb$ 、 $\Delta total-Hb$ 、 SmO_2 のデータには 1 名の被験者に欠損値があったため、10 名の平均値を示した。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。

第 3 節 結果

第 1 項 間欠性スプリントパフォーマンスおよび筋活動

55-65 分間におけるスプリント中の平均仕事量を図 3-2a に示した。試行間に有意な差が認められ ($p < 0.05$)、60% RW 試行、30% RW 試行はコントロール

試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。60% RW 試行、30% RW 試行間には有意な差は認められなかった。

55-65 分間におけるスプリント中の RMS を図 3-2b に示した。試行間に有意な差が認められ ($p < 0.05$)、60% RW 試行、30% RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。60% RW 試行、30% RW 試行間には有意な差は認められなかった。

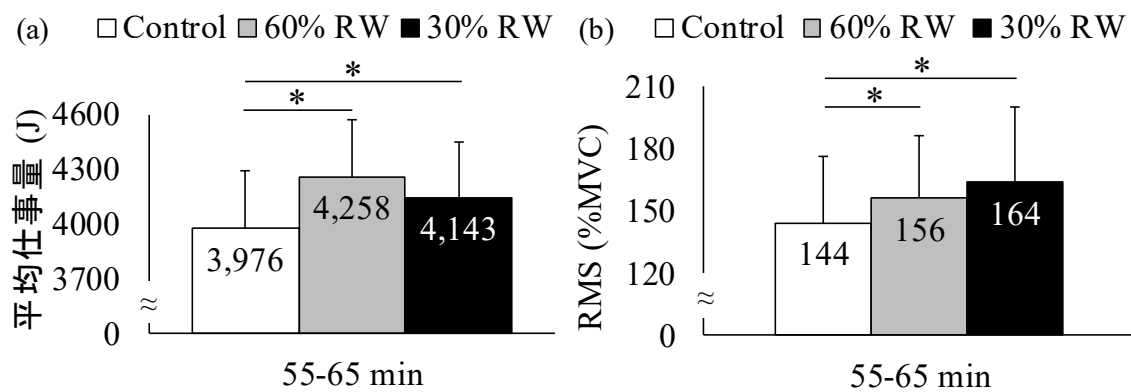


図 3-2 スプリント中の平均仕事量 (a) および筋活動 (b)

n=11(a)、n=10(b)、平均値±標準偏差、対応のある一元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、60% RW 3 min of the cycling at 60% of VO_{2max} trial、30% RW 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、RMS root mean square

平均仕事量：試行の主効果 $p < 0.05$

RMS：試行の主効果 $p < 0.05$

* vs コントロール試行 $p < 0.05$

第 2 項 推定筋温

各測定ポイントにおける推定筋温を図 3-3 に示した。Pre、40 分、55 分における推定筋温は、試行間に有意な差は認められなかった。60 分における 60% RW 試行の推定筋温はコントロール試行、30% RW 試行と比較し、有意な高値を示

した ($p < 0.05$)。65 分における 60% RW 試行の推定筋温はコントロール試行、30% RW 試行と比較し、高値を示す傾向が認められた (vs コントロール試行 $p = 0.08$ 、vs 30% RW 試行 $p = 0.08$)。

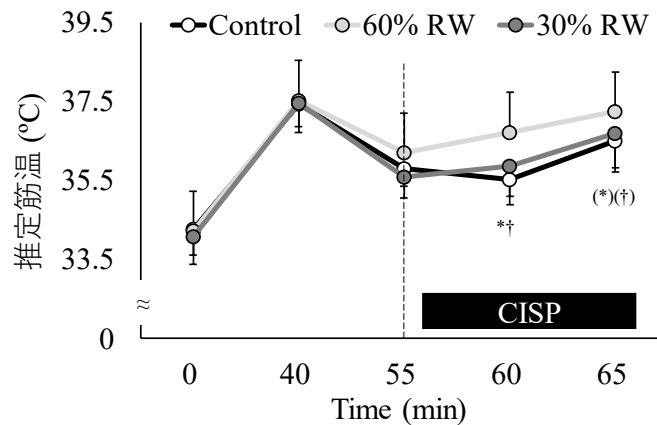


図 3-3 各測定ポイントにおける推定筋温

n=11、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*60% RW* 3 min of the cycling at 60% of VO_{2max} trial、*30% RW* 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial

試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p > 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs 60% RW 試行 $p < 0.05$

(*) コントロール試行 vs 60% RW 試行 $0.1 > p > 0.05$

† 60% RW 試行 vs 30% RW 試行 $p < 0.05$

(†) 60% RW 試行 vs 30% RW 試行 $0.1 > p > 0.05$

第 3 項 呼吸代謝

pre、0-40 分、54-55 分間における VO_2 、 VCO_2 、 RER を表 3-1 に示した。pre、0-40 分における VO_2 、 VCO_2 、 RER は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における 60% RW 試行、30% RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し ($p < 0.05$)、60% RW 試行は 30% RW 試行と比較し、

有意な高値を示した ($p < 0.05$)。54-55 分間における 60% RW 試行、30% RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し ($p < 0.05$)、60% RW 試行は 30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。54-55 分間における 60% RW 試行の RER はコントロール試行、30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

表 3-1 各測定ポイントにおける呼気代謝、心拍数および主観的運動強度

		Control	60% RW	30% RW	p value
VO_2 (ml/kg/min)	Pre	4.8 ± 0.6	4.9 ± 0.5	4.8 ± 0.8	Trial < 0.05
	0-40 min	29.7 ± 4.2	29.0 ± 4.8	29.5 ± 4.2	Time < 0.05
	54-55 min	6.6 ± 0.8	$19.1 \pm 3.2^*$	$12.2 \pm 1.6^{*\dagger}$	Interaction < 0.05
VCO_2 (ml/kg/min)	Pre	4.0 ± 0.6	4.0 ± 0.5	4.0 ± 0.7	Trial < 0.05
	0-40 min	27.5 ± 4.3	26.8 ± 4.8	27.7 ± 3.9	Time < 0.05
	54-55 min	5.5 ± 0.7	$17.6 \pm 3.2^*$	$9.7 \pm 1.0^{*\dagger}$	Interaction < 0.05
RER (A.U.)	Pre	0.82 ± 0.04	0.82 ± 0.05	0.83 ± 0.03	Trial < 0.05
	0-40 min	0.93 ± 0.03	0.93 ± 0.02	0.95 ± 0.02	Time < 0.05
	54-55 min	0.83 ± 0.06	$0.92 \pm 0.05^*$	$0.80 \pm 0.04^\dagger$	Interaction < 0.05
HR (% HR_{max})	Pre	35 ± 4	35 ± 3	36 ± 3	
	0-40 min	71 ± 3	72 ± 4	72 ± 4	Trial < 0.05
	54-55 min	46 ± 5	$63 \pm 7^*$	$52 \pm 3^{*\dagger}$	Time < 0.05
	55-65 min	72 ± 4	$77 \pm 5^*$	75 ± 4	Interaction < 0.05
RPE (A.U.)	Pre	6.5 ± 1.0	6.5 ± 1.2	6.5 ± 1.5	
	40 min	12.0 ± 2.5	11.9 ± 2.6	11.9 ± 2.4	Trial < 0.05
	55 min	8.9 ± 2.5	10.8 ± 2.1	$9.2 \pm 1.7^\dagger$	Time < 0.05
	60 min	11.5 ± 2.1	11.7 ± 2.5	11.1 ± 2.2	Interaction < 0.05
	65 min	12.2 ± 2.2	12.3 ± 2.6	11.8 ± 2.4	

n=11、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*60% RW* 3 min of the cycling at 60% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial、*30% RW* 3 min of the cycling at 30% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial、 VO_2 oxygen uptake、 VCO_2 carbon dioxide production、 RER respiratory exchange ratio、 HR heart rate、 RPE rating of perceived exertion

* vs コントロール試行 $p < 0.05$

† vs 60% RW 試行 $p < 0.05$

55-65 分間における 10 秒ごとの VO_2 、 VCO_2 、RER を図 3-4 に示した。55-65 分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行の VO_2 の平均値は、それぞれ $31.9 \pm 3.8 \text{ ml/kg/min}$ 、 $32.4 \pm 5.4 \text{ ml/kg/min}$ 、 $31.7 \pm 3.6 \text{ ml/kg/min}$ であった。試行間には有意な差は認められなかった。55 分 0 秒から 55 分 40 秒における 60% RW 試行、30% RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 30 秒から 55 分 50 秒における 60% RW 試行の VO_2 は 30% RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 3-4a)。

55-65 分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行の VCO_2 の平均値は、それぞれ $28.9 \pm 4.5 \text{ ml/kg/min}$ 、 $30.5 \pm 5.6 \text{ ml/kg/min}$ 、 $29.6 \pm 3.7 \text{ ml/kg/min}$ であった。試行間には有意な差は認められなかった。55 分 0 秒から 55 分 40 秒における 60% RW 試行、30% RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、60% RW 試行は 30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 40 秒から 56 分 20 秒および 56 分 30 秒から 40 秒における 60% RW 試行、30% RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 3-4b)。

55-65 分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行の RER の平均値は、それぞれ $0.90 \pm 0.06 \text{ A.U.}$ 、 $0.94 \pm 0.06 \text{ A.U.}$ 、 $0.93 \pm 0.06 \text{ A.U.}$ であった。60% RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 55 分 30 秒における 60% RW 試行の RER はコントロール試行、30% RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 30 秒から 56 分 0 秒における 60% RW 試行、30% RW 試行の RER はコントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、60% RW 試行の RER は 30% RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。56 分 0 秒から 58 分 0 秒における 60% RW 試行、30% RW 試行の RER はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 3-4c)。

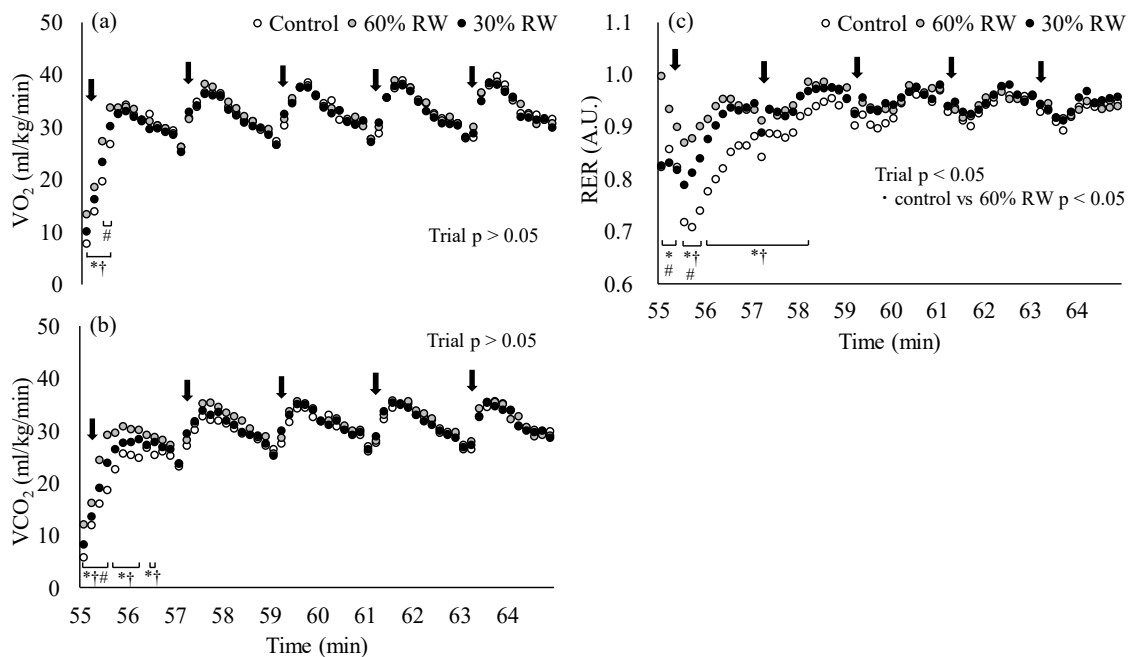


図 3-4 10 秒ごとの酸素摂取量 (a)、二酸化炭素排出量 (b)、呼吸交換比 (c)

n=11、平均値、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、60% RW 3 min of the cycling at 60% of $\text{VO}_{2\max}$ trial、30% RW 3 min of the cycling at 30% of $\text{VO}_{2\max}$ trial

エラーバーは明快さのために省略した。矢印は CISP 中のスプリントを示す。

VO_2 : 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

VCO_2 : 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

RER : 試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs 60% RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs 30% RW 試行 $p < 0.05$

60% RW 試行 vs 30% RW 試行 $p < 0.05$

第 4 項 筋酸素動態

pre、0-40 分、54-55 分間における $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 の平均値を表 3-2 に示した。pre、0-40 分間における $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、

SmO₂は試行間に有意な差は認められなかった。54-55分間における60% RW 試行、30% RW 試行のΔdeoxy-HbおよびSmO₂の平均値はコントロール試行と比較し、それぞれ有意な高値、有意な低値を示した (p < 0.05)。

表 3-2 各測定ポイントにおける筋酸素動態

		Control	60% RW	30% RW	p value
	Pre	-	-	-	Trial > 0.05
Δoxy-Hb (μmol/L)	0-40 min	-2.7 ± 6.9	0.2 ± 1.7	0.0 ± 4.3	Time < 0.05
	54-55 min	10.3 ± 5.6	9.3 ± 4.4	8.4 ± 3.5	Interaction > 0.05
	Pre	-	-	-	Trial < 0.05
Δdeoxy-Hb (μmol/L)	0-40 min	5.4 ± 4.1	4.6 ± 4.3	5.3 ± 2.8	Time < 0.05
	54-55 min	-4.5 ± 3.7	1.0 ± 6.0*	0.5 ± 3.6*	Interaction < 0.05
	Pre	-	-	-	Trial > 0.05
Δtotal-Hb (μmol/L)	0-40 min	2.7 ± 5.5	5.4 ± 2.9	5.3 ± 3.3	Time < 0.05
	54-55 min	5.8 ± 7.7	11.7 ± 5.7	8.9 ± 5.5	Interaction > 0.05
	Pre	65.5 ± 6.0	65.1 ± 6.2	64.2 ± 5.4	Trial < 0.05
SmO ₂ (%)	0-40 min	59.8 ± 5.5	59.5 ± 6.9	59.0 ± 5.9	Time < 0.05
	54-55 min	74.6 ± 4.3	67.1 ± 5.7*	68.0 ± 6.1*	Interaction < 0.05

n=10、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、60% RW 3 min of the cycling at 60% of VO_{2max} trial、30% RW 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial

* vs コントロール試行 p < 0.05

55-65分間における10秒ごとのΔoxy-Hb、Δdeoxy-Hb、Δtotal-Hb、SmO₂の平均値を図3-5に示した。55-65分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行のΔoxy-Hbの平均値は、それぞれ-1.6 ± 3.9 μmol/L、2.0 ± 2.0 μmol/L、1.3 ± 4.3 μmol/Lであった。60% RW 試行、30% RW 試行のΔoxy-Hbはコントロール試行と比較し、高値を示す傾向が示された (vs 60% RW 試行 p=0.07、vs 30%

RW 試行 $p=0.06$) (図 3-5a)。55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値は、コントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行でそれぞれ $-2.0\pm 3.9 \mu\text{mol/L}$ 、 $1.8\pm 2.0 \mu\text{mol/L}$ 、 $1.0\pm 4.3 \mu\text{mol/L}$ であった。60% RW 試行、30% RW 試行はコントロール試行と比較し、高値を示す傾向が認められた (vs 60% RW 試行 $p=0.06$ 、vs 30% RW 試行 $p=0.06$)。

55-65 分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ の平均値は、それぞれ $4.5\pm 3.5 \mu\text{mol/L}$ 、 $5.2\pm 5.0 \mu\text{mol/L}$ 、 $4.8\pm 3.0 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 0 秒から 55 分 10 秒における 30% RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 10 秒から 55 分 20 秒における 60% RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 3-5b)。

55-65 分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行の $\Delta\text{total-Hb}$ の平均値は、それぞれ $2.9\pm 4.9 \mu\text{mol/L}$ 、 $7.9\pm 4.3 \mu\text{mol/L}$ 、 $6.1\pm 4.4 \mu\text{mol/L}$ であった。60% RW 試行の $\Delta\text{total-Hb}$ はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 3-5c)。

55-65 分間におけるコントロール試行、60% RW 試行、30% RW 試行の SmO_2 の平均値は、それぞれ $60.9\pm 6.3 \%$ 、 $60.3\pm 7.9 \%$ 、 $60.2\pm 6.8 \%$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 0 秒から 55 分 10 秒における 60% RW 試行、30% RW 試行の SmO_2 はコントロール試行と比較し有意な低値を示した ($p < 0.05$)。55 分 10 秒から 55 分 20 秒における 60% RW 試行の SmO_2 はコントロール試行、30% RW 試行と比較し有意な低値を示した ($p < 0.05$) (図 3-5d)。

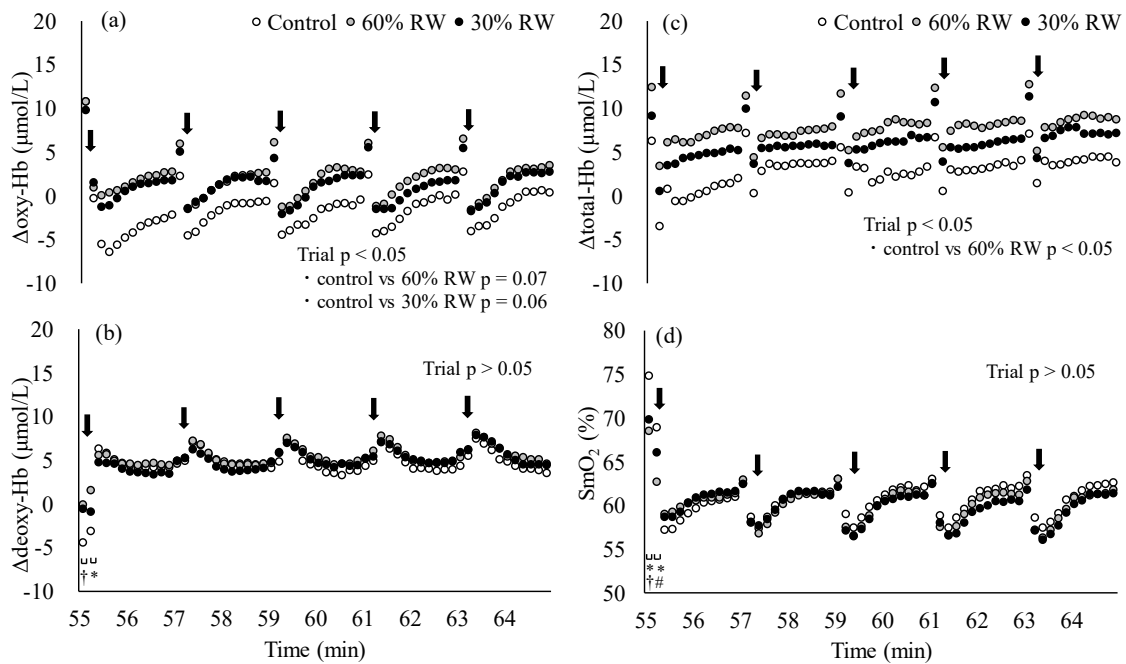


図 3-5 10 秒ごとの酸化ヘモグロビン濃度 (a)、脱酸化ヘモグロビン濃度 (b)、総ヘモグロビン濃度 (c) の安静時からの変化量および筋酸素飽和度 (d)

n=10、平均値、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、60% RW 3 min of the cycling at 60% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial、30% RW 3 min of the cycling at 30% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial

エラーバーは明快さのために省略した。矢印は CISP 中のスプリントを示す。

Δ oxy-Hb：試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p > 0.05$

Δ deoxy-Hb：試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

Δ total-Hb：試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p > 0.05$

SmO_2 ：試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs 7 min RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs 3 min RW 試行 $p < 0.05$

60% RW 試行 vs 30% RW 試行 $p < 0.05$

第 5 項 心拍数および主観的運動強度

各測定ポイントにおける平均心拍数を表 3-1 に示した。pre、0-40 分間における平均心拍数は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における 60% RW 試行、30% RW 試行の平均心拍数はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し ($p < 0.05$)、60% RW 試行の平均心拍数は 30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55-65 分間における 60% RW 試行の平均心拍数はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

各測定ポイントにおける RPE の平均値を表 3-1 に示した。55 分における 60% RW 試行の RPE は 30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

第 4 節 考察

本研究の主な知見は、3 分間・30% VO_{2max} の RW がその後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させたこと、またそのパフォーマンス向上効果が 3 分間・60% VO_{2max} の RW とほぼ同様であったことである。コントロール試行と比較した 30% RW 試行の間欠性スプリントパフォーマンス向上率は 4.2% であり、先行研究で示されてきた 7 分間・70% HR_{max} の RW とほぼ同様のパフォーマンス向上率を示した (Lovell ら 2013: 5.0%(30)、Mohr ら 2004: 4.0%(37))。短時間・低強度の RW プロトコルであっても、先行研究の RW プロトコルおよび短時間・中強度の RW とほぼ同様の運動パフォーマンス向上効果を示したことは、実際のスポーツ現場での応用を考慮した場合に重要な知見であると考えられる。

近年の RW に関する総説は、5-7 分間・70% HR_{max} の強度の RW がその後のスプリントパフォーマンスの維持・向上のために推奨されることを示しているが (15,51,54)、本研究では 3 分間・30% VO_{2max} の強度の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。本研究で用いた 3 分間・30%

VO_{2max} の強度の RW プロトコルの利点は、先行研究と比較し短時間且つ低強度であることである。RW に関する総説で推奨されている RW の運動時間は 5-7 分間であるが、実際の試合で RW に確保できる時間は 3 分間以内であることが示されており、これまでの RW プロトコルは現場応用には適さない(15,51,54,62)。

第 2 章と同様に、RW の運動時間を 3 分間に短縮した場合でも運動パフォーマンスを向上させ、また運動パフォーマンス向上効果はその運動強度に関わらず同一であるという本研究の結果は RW の現場応用に向けて、重要な知見の一つであるといえる。さらに運動強度に関して、30% RW 試行は 60% RW 試行と比較し、RW 後の生理学的メリットがあると考えられる。54-55 分における 30% RW 試行の VCO₂ および RER は 60% RW 試行と比較し有意な低値を示し、55-65 分における RER は 60% RW 試行のみコントロール試行と比較し有意な高値を示している。また、CISP 開始直後の 30% RW 試行の VCO₂ は 60% RW 試行と比較し有意な低値を示している。これらの結果は、RW 後の嫌気性代謝が 30% RW 試行と比較し 60% RW 試行で高い可能性を示している。間欠的運動能力が要求される球技系スポーツにおいて、試合終了前の運動パフォーマンスの低下の一要因として、嫌気性代謝が試合終了前に減少することが挙げられる(36)。従って、嫌気性代謝の消費を抑制することは選手によって重要であると考えられる。また、ハーフタイム終了時である 55 分の RPE は 30% RW 試行で 60% RW 試行と比較し有意な低値を示しており、30% RW 試行は 60% RW 試行と比較し、実施のための尽力が低く現場応用に容易である可能性がある。これらの結果は、短時間・中強度の RW プロトコルと比較し、短時間・低強度の RW プロトコルがハーフタイム戦術として優れている可能性があることを示していると考えられる。

本研究における 60% RW 試行が間欠性スプリントパフォーマンスを向上させたメカニズムの一つに筋温の向上が挙げられる可能性がある。筋温はスプリン

トパフォーマンスに寄与する要因の一つであり、実際に Mohr らはハーフタイム前後におけるスプリントパフォーマンスの低下と筋温の低下には正の相関関係があり ($r=0.6$)、ハーフタイムで安静を保った場合は筋温が低下したが 7 分間・70% HR_{max} の強度で RW を実施した場合は筋温が低下しなかったことを報告している(37)。本研究での筋温の測定は皮膚温からの推定であり限界点はあるものの、60% RW 試行でコントロール試行と比較し、60 分で有意な高値、65 分で高値を示す傾向が認められた。60% RW 試行はハーフタイム中の筋温の低下を抑制できていないが、60% VO_{2max} の強度の RW によって CISP 中の筋温が高まったことは、間欠性スプリントパフォーマンスの向上に寄与していた可能性がある。一方で、30% RW 試行には RW による筋温の変化は認められなかった。しかし、間欠性スプリントパフォーマンスは 60% RW 試行と同様の上昇率を示している。即ち、30% RW 試行が間欠性スプリントパフォーマンスを向上させたメカニズムは筋温以外であることが推察される。

本研究は筆者の知る限り初めて、RW がその後の筋活動に与える影響を検討した。その結果、CISP 中のスプリントにおける外側広筋の RMS は 60% RW、30% RW 試行でコントロール試行と比較し、有意な高値を示した。この結果から、筋電図から評価した筋活性が 60% RW、30% RW 試行で CISP 中に高まっていたことが推察される。サイクリングスプリント中の RMS はパワー出力と正の相関関係があることが報告されていることから(21)、筋活性の向上は 60% RW、30% RW 試行における間欠性スプリントパフォーマンスの向上に寄与したメカニズムの一つである可能性が考えられる。先行研究において、低、中強度のウォーミングアップは筋活性の向上を促す可能性が報告されている(18,19,55)。例えば、Sotiropoulos らは 25%および 35% 1RM の強度のハーフスクワットが外側広筋の筋電図から評価した筋活性を高め、その結果ジャンプパフォーマンスを向上させたことを示している(55)。また、ダイナミックストレッチもストレッチ

チ前後およびスタティックストレッチと比較し、筋電図から評価した筋活性を高めることが示されている(18,19)。これらの詳細なメカニズムは明らかとなっていないが、ウォーミングアップによる運動皮質の興奮性の向上が挙げられる。先行研究によると、10%、25%、50% MVC の強度の筋収縮後 1 分間は運動皮質の興奮性の向上によって運動誘発電位を上昇させることが示されている(2)。従って、CISP 開始直前に RW を実施することで運動皮質の興奮性が向上し、運動皮質から発生する活動電位が上昇した結果、スプリント中の RMS が上昇した可能性がある。しかし本研究からは RW が筋活性を高めたメカニズムを明らかにすることはできず、今後の研究が望まれる。

本研究では、CISP 中におけるアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ がコントロール試行と比較し、60% RW 試行、30% RW 試行で高値を示す傾向が認められた。従って、第 2 章と同様に 30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ および 60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW はスプリント後の筋内の酸素利用性を向上させる効果を有している可能性が示された。スプリント後の酸素利用性の向上はスプリントによって低下した PCr の再合成の加速に寄与することから(16)、本研究の 60% RW 試行、30% RW 試行はスプリント後の PCr の再合成を加速させていた可能性が考えられる。 oxy-Hb は活動筋への酸素供給と消費のバランスを反映することから(58)、本研究における $\Delta\text{oxy-Hb}$ の向上は酸素供給が亢進していたもしくは酸素消費が減少していた可能性が考えられる。先行研究によると活動筋内の酸素消費は筋活動に強く関係していることが報告されている(34)。本研究では、スプリント中の RMS はコントロール試行と比較し、60% RW 試行、30% RW 試行で高値を示していることから、活動筋における酸素消費量が 60% RW 試行、30% RW 試行でコントロール試行と比較し低いことは考えづらい。従って、第 2 章で示した通り、RW によって CISP 中の血管拡張または筋血流量の増加により活動筋への酸素供給が高まった可能性が考えられる。

第 5 節 結論

本研究は、異なる RW の運動強度、特に 30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。その結果、30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 、60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は安静を保った場合と比較し、その後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させ、30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は 60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW と同等の後半開始後 10 分間の運動パフォーマンス向上効果を有することが明らかになった。またそのメカニズムとして、60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は CISP 中の筋温の上昇および筋活性の上昇、30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は筋活性の上昇が考えられた。また VCO_2 、 RER 、 RPE の結果から 30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は、60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW よりもその後の身体的負荷が低い可能性が示された。本研究の結果は、3 分間・30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW プロトコルがハーフタイム戦術の一つとして有効である可能性を示している。

第 4 章

エネルギー消費量を統一した異なる構成の RW が 間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響

第 1 節 緒言

第 3 章より、3 分間・30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW はその後の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させることが明らかとなり、またそのメカニズムは筋温の上昇ではなく、筋活性の向上が影響している可能性が示された。3 分間の RW が運動強度に関わらず間欠性スプリントパフォーマンスを向上させることは重要な知見である。しかし、実際の試合のハーフタイムにおいて RW の実施を制限する最も大きな要因が時間的制約であることから(62)、スポーツ現場での応用を考慮し、より短時間の RW であってもその後の運動パフォーマンスを向上させるか検討する必要があると考えられる。ウォーミングアップがその後の運動パフォーマンスを向上させる 3 つの主なメカニズムである体温・エネルギー代謝・筋活動に与える影響は、ウォーミングアップの強度が高いほど大きい(4,5,33,45)。第 3 章で間欠性スプリントパフォーマンスの向上に重要である可能性が示された筋活動に着目すると、最大もしくは最大下の強度の筋収縮をウォーミングアップで行うことが望ましいと報告されている(61)。一方で先行研究によると筋活性の促進による運動パフォーマンスの向上効果は、ウォーミングアップの運動強度のみならずウォーミングアップの仕事量が重要である可能性も示されている(74)。島らはウォーミングアップとして 40%および 80% 1RM の強度のハーフスクワットを仕事量が同一となるように実施した後のカウンタームーブメントジャンプのジャンプ高を検討しており、両試行とも同様のジャンプ高の向上が認められたことを報告している(74)。第 3 章より 3 分間・30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させた

ことから、同一エネルギー消費量となる 1 分間・90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW を実施した場合でも、間欠性スプリントパフォーマンスを向上させる可能性が考えられる。

従って、本研究の目的はエネルギー消費量を統一した異なる構成の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討することとし、そのメカニズムの検討として筋活動に着目し、RW がそれらに与える影響も検討した。

第 2 節 方法

第 1 項 被験者

本研究は、1 回あたり 1 時間以上の運動を週 2 回以上行っている健康な若年成人男性 12 名を対象とした。被験者の身体特性は、年齢 23.4 ± 2.4 歳、身長 1.71 ± 0.05 m、体重 68.5 ± 8.7 kg、 $\text{VO}_{2\text{max}}$ 47.7 ± 6.6 ml/kg/min（平均 \pm 標準偏差）であった。被験者には、試験開始前に研究参加に関する説明を十分に実施し、書面にて研究参加に対する同意を得た。本研究は、早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得て、実施した（認証番号 2017-286）。

第 2 項 研究デザイン

本研究は、ハーフタイムの内容のみ異なる 3 試行の無作為化交差試験法を用いた。本試験では、15 分間のハーフタイムを挟み 2 回の間欠性サイクリング運動を 2 回実施した。ハーフタイムの内容は、1) 15 分間の安静座位（コントロール試行）、2) 3 分間・30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度のサイクリングを行う RW（3 \times 30% RW 試行）、3) 1 分間・90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度のサイクリングを行う RW（1 \times 90% RW 試行）のいずれかとした。運動パフォーマンステストとしての 2 回目の間欠性運動は、CISP を用いた。第 2 章より RW は後半開始後 10 分間の間欠性スプリン

トパフォーマンスを向上させるため、2 回目の間欠性サイクリング運動は 10 分間とした。

生活習慣が結果に与える影響を考慮し、第 2 章に準じた禁止事項が指示された。

また、本試験の測定項目に対する日内変動の影響を避けるため、3 試行はすべて同じ時間に開始した。本試験開始の 3 日以上前に、被験者は本試験の練習試技を実施した。3 試行の本試験は 3 日以上の間隔を空けて実施した。本試験中の気温および湿度は、それぞれ $20.2 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $51.4 \pm 2.3\%$ であった。

第 3 項 実験スケジュール

被験者は、最初に $\text{VO}_{2\text{max}}$ および HR_{max} を測定するために自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）を用いた漸増負荷試験を実施した。漸増負荷試験は 40W の負荷から開始し、2 分毎に 40W 増加させ、被験者が疲労困憊となるまで実施した。目標回転数は 80 回/分とした。漸増負荷試験中、呼気ガス分析機（Quark CPET, COSMED, Rome, Italy）を用いて VO_2 を測定した。また、心拍計（Polar RCX3, Polar Electro, Kempele, Finland）を用い、心拍数を 5 秒ごとに測定した。

本試験のプロトコルを図 4-1 に示した。ハーフタイム以外のプロトコルは第 3 章と同様とした。本試験はすべて自転車エルゴメーター（Monark 894E、Monark、Varberg、Sweden）を用いた。被験者は 5 分間の安静を保った後、ウォーミングアップを実施した。ウォーミングアップは、95 W の負荷で 5 分間のサイクリングの後に 30 秒の休息を挟み、最後に 120 W の負荷で 30 秒間のサイクリングを行うものとした。その後、5 分間の休息を保ち、1 回目の 40 分間の間欠性自転車運動を実施した。1 回目の間欠性自転車運動は 2 分×20 ステージの運動とし、2 分間の内訳は 15 秒の安静座位、25 秒の無負荷のサイクリング、10 秒の高強

度運動（130% $\text{VO}_{2\text{max}}$ ）、70 秒の中強度運動（60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ ）とした。サイクリングの目標回転数は 80 回/分とした。1 回目の間欠性自転車運動が終了した後、被験者は 15 分間のハーフタイムを実施した。ハーフタイムでは、1) 15 分間の安静座位を保つコントロール試行、2) 11 分間の安静座位の後に 3 分間の RW を 30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度で行う $3 \times 30\% \text{RW}$ 試行、3) 13 分間の安静座位の後に 1 分間の RW を 90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度で行う $1 \times 90\% \text{RW}$ 試行のいずれかとした。RW は 2 回目の間欠性自転車運動の開始の 1 分前に終了した。 $3 \times 30\% \text{RW}$ 試行の運動時間および強度は、第 3 章より設定した。 $1 \times 90\% \text{RW}$ 試行の運動強度は、代謝当量（METs：1 METs = 酸素摂取量 3.5 mL/kg/min）を用いてエネルギー消費量を概算する公式（エネルギー消費量 = METs \times 3.5 \times 体重[kg] \times 時間[分] / 200）を用い、 $3 \times 30\% \text{RW}$ 試行と RW 中のエネルギー消費量が同一になると概算される強度に設定した(1)。ハーフタイム終了後、被験者は 2 回目の 10 分間の間欠性自転車運動を実施した。2 回目の間欠性自転車運動は、CISP を用いた。CISP は 2 分 \times 5 ステージの運動とし、2 分間の内訳は 10 秒の安静座位、体重の 7.5% の重りを負荷した 5 秒のスプリント、105 秒の 50% $\text{VO}_{2\text{max}}$ のアクティブリカバリーとした。5 秒のスプリントは静止状態で右足のクランクが 90 度となる位置から開始した。105 秒のアクティブリカバリー時の目標回転数は 80 回/分とした。

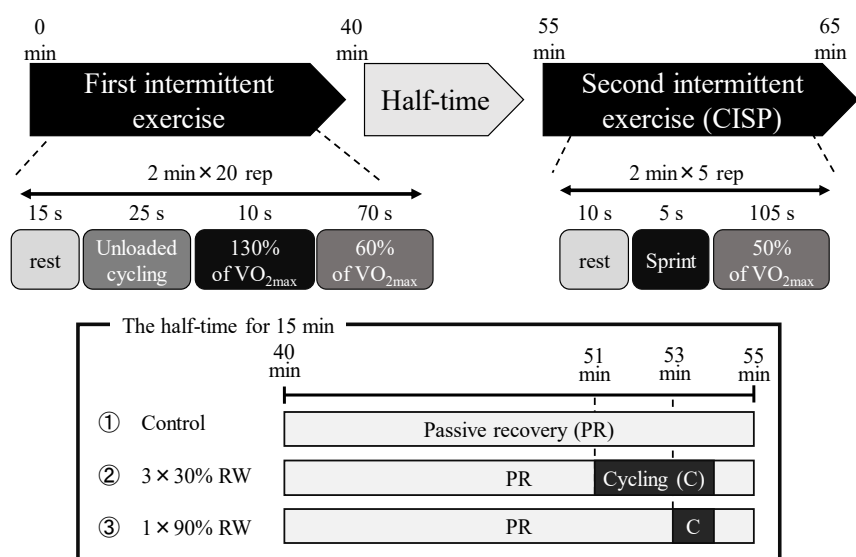


図 4-1 実験プロトコル

CISP The Cycling Intermittent-Sprint Protocol、*Control* 15 min of seated rest trial、 $3 \times 30\%$ *RW* 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、 $1 \times 90\%$ *RW* 1 min of the cycling at 90% of VO_{2max} trial

第 4 項 測定項目

4-1. スプリントパフォーマンス

CISP 中の 5 秒間のスプリントの仕事量を、Anaerobic Test Software (Monark ATS Software, Monark, Varberg, Sweden) を用いて測定した。仕事量はスプリントにおける平均パワー出力を秒数 (5 秒) で乗じることによって算出し、55-65 分間の平均仕事量を求めた。

4-2. 筋電図

CISP における右脚外側広筋の筋腹部の筋活動を表面筋電図 (SX230-1000, Biometrics, Newport, United Kingdom) を用いて測定した。サンプリング周波数は 1000 Hz とし、アース電極は左手首に装着した。皮膚抵抗を低減させるため ($< 2 \text{ k}\Omega$)、電極を貼り付ける前に皮膚に鬚を掛け、アルコールで洗浄した。測

定部位は、膝蓋骨と大転子間の 30%の長さの部位とし、3 試行間で同じ部位から測定するために測定部位をサージカルマーカで記した。スプリント中のバーストの開始から終了までの RMS を算出し、55-65 分間の平均値を求めた。RMS の正規化のために 3 秒間の徒手抵抗による MVC を本試験開始前に実施した。100% MVC 値は 3 秒間の MVC 中の 1 秒間を使用し、得られた値を用い正規化した。またスプリント中のバーストの開始から終了までの周波数分析も実施し、55-65 分間の中央周波数 (MDF) の平均値を算出した。バーストの開始は、 ± 0.2 mV の電気閾値を用い定義した(44)。

4-3. 体温

本試験における安静時 (pre) から 65 分までの間、直腸温および皮膚温を測定した。直腸温は、直腸温度測定プローブ (401J, Nikkiso-therm, Tokyo, Japan) を直腸内に 10~12 cm 挿入し測定した。皮膚温は、上腕部、胸部、大腿部および下腿部にボタン型温度データロガー (Thermochron SL, KN Laboratories, Osaka, Japan) を貼付し測定した。平均皮膚温は、Ramanathan の 4 点法 (平均皮膚温 $= 0.3 \times [\text{上腕部} + \text{胸部}] + 0.2 \times [\text{大腿部} + \text{下腿部}]$) を用いて算出した(47)。また大腿部の皮膚温から推定した大腿部の筋温を算出した。大腿部の推定筋温の算出のために先行研究で用いられている公式 (筋温 $= \text{皮膚温} \times 1.02 + 0.89$) を用いた(48)。直腸温、平均皮膚温および推定筋温は pre、40 分、55 分、60 分、65 分の平均値を算出した。

4-4. 呼吸代謝

本試験における安静時から 65 分までの間、呼吸ガス分析機 (Quark CPET, COSMED, Rome, Italy) を用いて VO_2 、 VCO_2 、RER を測定した。pre、0-40 分、54-55 分間ではそれぞれの平均値、55-65 分間では 10 秒ごとの平均値を算出し

た。

4-5. 筋酸素動態

770 nm と 830 nm の 2 種類の波長を使用した NIR_{SRS}(Hb14, ASTEM, Kanagawa, Japan)を用いて、右脚外側広筋の筋腹部の筋酸素動態を 5 Hz で測定した。NIR_{SRS} のプローブは 1 つの送光部と 2 つの受光部で形成されており、送光部と受光部の距離はそれぞれ 20 mm、30 mm であった。NIR_{SRS} は、非侵襲的に oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb の安静時からの Δ および SmO₂ を継続して測定することができる。測定用プローブは表面筋電図の電極と隣接させた。本研究における安静は、ウォーミングアップ前の安静とし、pre、0-40 分、54-55 分間ではそれぞれの平均値、55-65 分間では 10 秒ごとの平均値を算出した。また、55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の Δ oxy-Hb の平均値も算出した。

NIR_{SRS} を用いる場合、測定部位の皮下脂肪厚は測定結果に大きな影響を与えることが明らかになっている(42)。近年の総説では皮下脂肪厚を測定することによって、得られた測定結果を補正できることが報告されている(43)。従って、本研究では本試験実施前に超音波装置 (LogiQ3, GE Healthcare, Tokyo, Japan) を用いて、測定部位の皮下脂肪厚を測定し、脂肪補正ソフトウェア (Hb14, ASTEM, Kanagawa, Japan) を使用し、測定結果を補正した。皮下脂肪厚の被験者内変動係数は 3.6 ± 1.5 % であった。

4-6. 心拍数および主観的運動強度

心拍数は、心拍計 (Polar RCX3, Polar Electro, Kempele, Finland) を用いて、本試験を通して 5 秒間隔で測定した。pre、0-40 分、54-55 分、55-65 分間で平均心拍数を算出した。

RPE は、ボルグスケールを用いて pre、40 分、55 分、60 分、65 分で測定した(6)。

第 5 項 統計解析

すべての値は平均値±標準偏差で示した。統計解析は統計分析ソフト（IBM SPSS Statistics Version 25.0, IBM Japan, Tokyo, Japan）を用いた。直腸温、皮膚温、推定筋温、 VO_2 、 VCO_2 、RER、 $\Delta oxy-Hb$ 、 $\Delta deoxy-Hb$ 、 $\Delta total-Hb$ 、 SmO_2 、HR、RPE は、対応のある二元配置の分散分析を用い分析した。試行の主効果または試行と時間の交互作用が認められた場合、Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。55-65 分間の平均仕事量、RMS、MDF および 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta oxy-Hb$ の平均値は、対応のある一元配置の分散分析を用い分析した。試行の主効果が認められた場合 Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。直腸温のデータには 1 名の被験者、皮膚温度のデータには 2 名の被験者、 $\Delta oxy-Hb$ 、 $\Delta deoxy-Hb$ 、 $\Delta total-Hb$ 、 SmO_2 のデータには 3 名の被験者に欠損値があったため、直腸温では 11 名、皮膚温では 10 名、 $\Delta oxy-Hb$ 、 $\Delta deoxy-Hb$ 、 $\Delta total-Hb$ 、 SmO_2 では 9 名の平均値を示した。統計学的有意水準は危険率 5%未満とした。

第 3 節 結果

第 1 項 間欠性スプリントパフォーマンスおよび筋活動

55-65 分間におけるスプリント中の平均仕事量、RMS、MDF を図 4-2 に示した。平均仕事量は試行間に有意な差が認められ ($p < 0.05$)、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した($p < 0.05$)。 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行間には有意な差は認められなかった。RMS は試行間に有意な差が認められ ($p < 0.05$)、 $3 \times 30\%$ RW 試行はコントロール試

行と比較し、有意な高値を示す傾向が認められた ($p = 0.06$)。MDF は試行間に有意な差が認められ ($p < 0.05$)、 $1 \times 90\%$ RW 試行はコントロール試行および $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

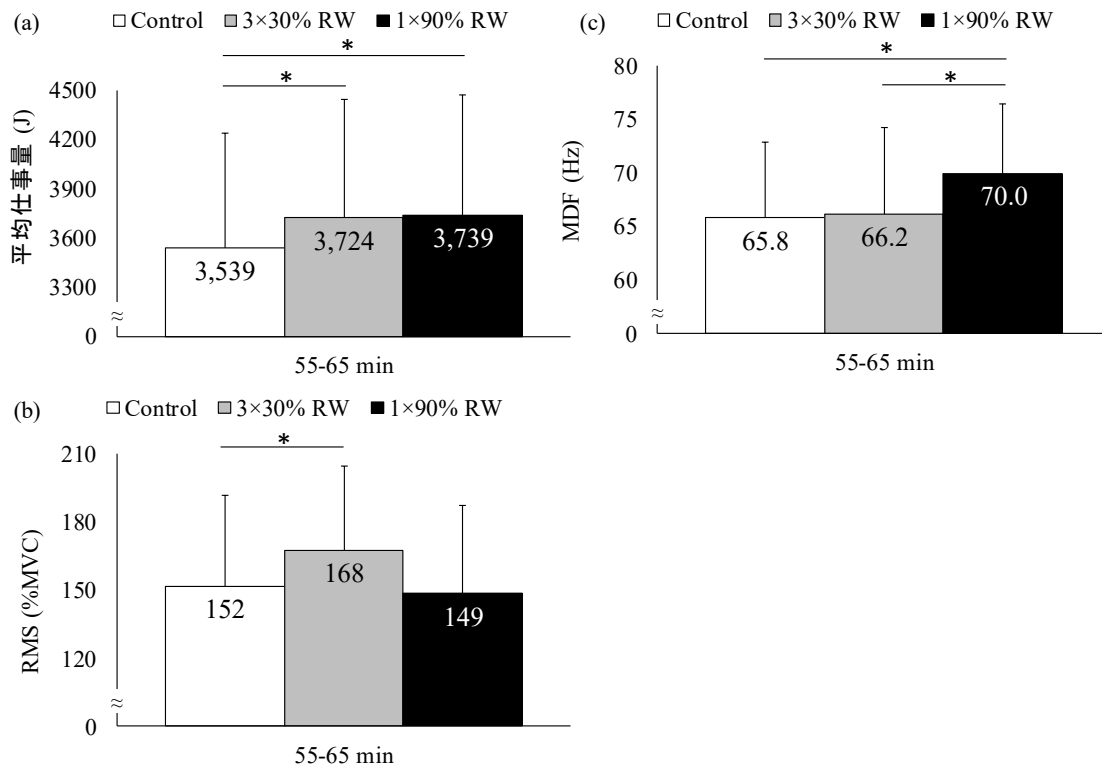


図 4-2 スプリント中の平均仕事量 (a)、筋放電量 (b) および周波数分析 (c)

$n=12$ 、平均値±標準偏差、対応のある一元配置の分散分析

CISP The Cycling Intermittent-Sprint Protocol、*Control* 15 min of seated rest trial、 $3 \times 30\%$ RW 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、 $1 \times 90\%$ RW 1 min of the cycling at 90% of VO_{2max} trial、*RMS* root mean square、*MDF* median power frequency

平均仕事量：試行の主効果 $p < 0.05$

RMS：試行の主効果 $p < 0.05$

MDF：試行の主効果 $p < 0.05$

* $p < 0.05$

第 2 項 体温

各測定ポイントにおける直腸温、平均皮膚温、推定筋温を表 4-1 に示した。

各測定ポイントにおける直腸温は、試行間に有意な差は認められなかった。60 分における 3×30% RW 試行の平均皮膚温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、1×90% RW 試行の平均皮膚温は、コントロール試行と比較し高値を示す傾向が認められた ($p=0.06$)。65 分における 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行の平均皮膚温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。60 分における 1×90% RW 試行の推定筋温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、3×30% RW 試行の推定筋温は、コントロール試行と比較し高値を示す傾向が認められた ($p=0.06$)。65 分における 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行の推定筋温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

表 4-1 各測定ポイントにおける直腸温、平均皮膚温および推定筋温

		Control	3×30% RW	1×90% RW	p value
直腸温 (°C)	Pre	37.2 ± 0.2	37.2 ± 0.3	37.2 ± 0.2	
	40 min	38.0 ± 0.2	37.9 ± 0.3	38.0 ± 0.2	Trial > 0.05
	55 min	37.8 ± 0.3	37.7 ± 0.3	37.8 ± 0.2	Time < 0.05
	60 min	37.7 ± 0.3	37.8 ± 0.2	37.9 ± 0.2	Interaction > 0.05
	65 min	37.8 ± 0.3	37.9 ± 0.2	38.0 ± 0.2	
平均皮膚温 (°C)	Pre	33.0 ± 0.9	33.1 ± 0.6	33.1 ± 0.7	
	40 min	35.3 ± 0.7	35.4 ± 0.6	35.4 ± 0.7	Trial > 0.05
	55 min	33.1 ± 1.0	33.5 ± 0.9	33.4 ± 1.0	Time < 0.05
	60 min	32.7 ± 1.0	33.5 ± 1.0*	33.3 ± 1.1 ^(*)	Interaction < 0.05
	65 min	33.3 ± 1.2	34.2 ± 1.0*	34.2 ± 1.2*	
推定筋温 (°C)	Pre	34.0 ± 1.0	34.3 ± 1.1	34.3 ± 0.8	
	40 min	37.0 ± 0.9	37.3 ± 0.8	37.3 ± 0.7	Trial > 0.05
	55 min	35.9 ± 0.8	36.0 ± 1.1	36.2 ± 0.8	Time < 0.05
	60 min	35.2 ± 0.8	35.7 ± 1.1 ^(*)	35.9 ± 0.8*	Interaction < 0.05
	65 min	35.5 ± 1.0	36.3 ± 1.1*	36.5 ± 1.0*	

n=11（直腸温）、n=10（平均皮膚温および推定筋温）、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、3×30% RW 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、1×90% RW 1 min of the cycling at 90% of VO_{2max} trial

* vs コントロール試行 p < 0.05

† vs 3×30% RW 試行 p < 0.05

40 分からの Δ 直腸温、Δ 平均皮膚温、Δ 推定筋温を図 4-3 に示した。Δ 直腸温には試行間の有意な差は認められなかった。55 分における 3×30% RW 試行の Δ 平均皮膚温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示した (p < 0.05)。60 分、65 分における 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行の Δ 平均皮膚温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示した (p < 0.05)。65 分における 3×30%

RW 試行、1×90% RW 試行の Δ 推定筋温は、コントロール試行と比較し有意な高値を示し ($p < 0.05$)、1×90% RW 試行は 3×30% RW 試行と比較し高値を示す傾向が認められた ($p=0.08$)。

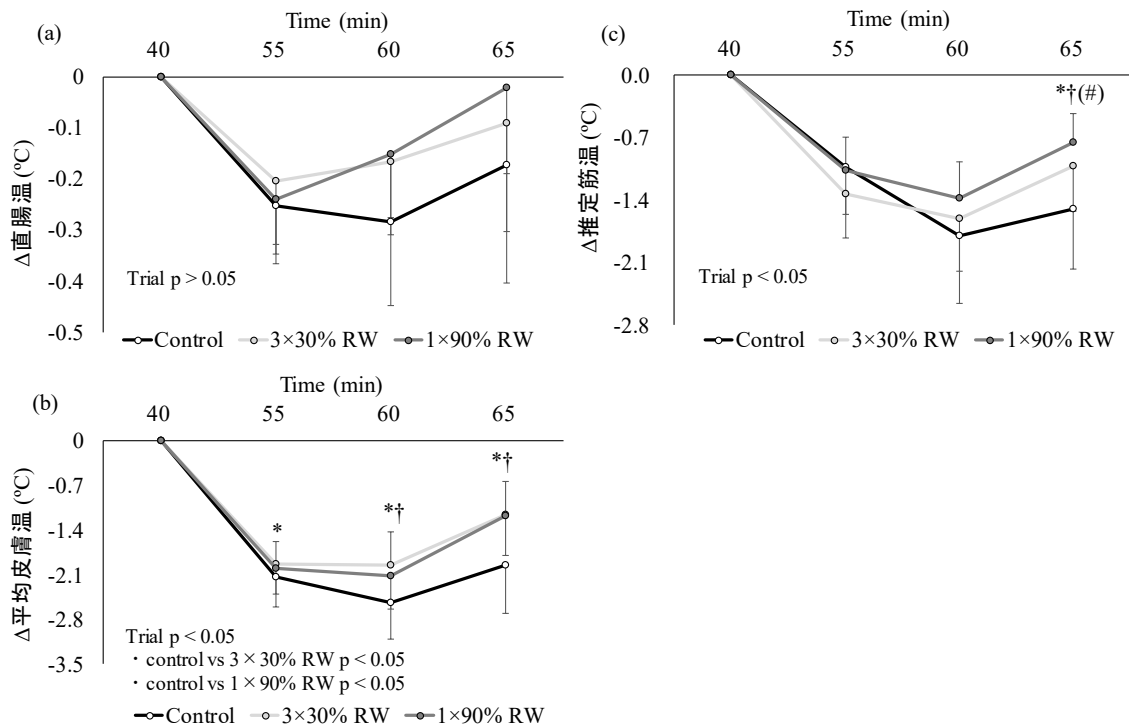


図 4-3 40 分からの直腸温 (a)、平均皮膚温 (b) および推定筋温 (c) の変化量
n=11(a)、n=10(b, c)、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

CISP The Cycling Intermittent-Sprint Protocol、Control 15 min of seated rest trial、3×30% RW 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、1×90% RW 1 min of the cycling at 90% of VO_{2max} trial

直腸温：試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p > 0.05$

平均皮膚温：試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

推定筋温：試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs 3×30% RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs 1×90% RW 試行 $p < 0.05$

(#) 3×30% RW 試行 vs 1×90% RW 試行 $0.1 > p > 0.05$

第3項 呼吸代謝

pre、0-40分、54-55分間における VO_2 、 VCO_2 、RERを表4-2に示した。pre、0-40分における VO_2 、 VCO_2 、RERは試行間に有意な差は認められなかった。54-55分間における $3 \times 30\%$ RW試行、 $1 \times 90\%$ RW試行の VO_2 はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し($p < 0.05$)、 $1 \times 90\%$ RW試行は $3 \times 30\%$ RW試行と比較し、有意な高値を示した($p < 0.05$)。54-55分間における $3 \times 30\%$ RW試行、 $1 \times 90\%$ RW試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し($p < 0.05$)、 $1 \times 90\%$ RW試行は $3 \times 30\%$ RW試行と比較し、有意な高値を示した($p < 0.05$)。54-55分間における $1 \times 90\%$ RW試行のRERはコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW試行と比較し、有意な高値を示した($p < 0.05$)。

表 4-2 各測定ポイントにおける呼吸代謝、心拍数および主観的運動強度

		Control	3×30% RW	1×90% RW	p value
VO ₂ (ml/kg/min)	Pre	5.0 ± 0.7	5.0 ± 0.8	5.0 ± 0.7	Trial < 0.05
	0-40 min	26.4 ± 3.0	26.2 ± 3.3	26.6 ± 3.4	Time < 0.05
	54-55 min	5.9 ± 1.2	11.2 ± 1.4*	23.1 ± 3.4*†	Interaction < 0.05
VCO ₂ (ml/kg/min)	Pre	4.1 ± 0.5	4.2 ± 0.8	4.2 ± 0.5	Trial < 0.05
	0-40 min	24.8 ± 3.1	24.6 ± 3.6	25.0 ± 3.5	Time < 0.05
	54-55 min	4.8 ± 0.9	9.2 ± 1.4*	23.5 ± 3.8*†	Interaction < 0.05
RER (A.U.)	Pre	0.83 ± 0.04	0.84 ± 0.05	0.83 ± 0.04	Trial < 0.05
	0-40 min	0.95 ± 0.02	0.95 ± 0.03	0.95 ± 0.03	Time < 0.05
	54-55 min	0.83 ± 0.08	0.82 ± 0.04	1.05 ± 0.07*†	Interaction < 0.05
HR (%HR _{max})	Pre	36 ± 5	35 ± 6	34 ± 5	
	0-40 min	70 ± 5	69 ± 3	69 ± 5	Trial < 0.05
	54-55 min	46 ± 5	49 ± 5*	68 ± 4*†	Time < 0.05
	55-65 min	70 ± 5	71 ± 4	74 ± 6*†	Interaction < 0.05
RPE (A.U.)	Pre	6.4 ± 1.2	7.6 ± 2.3	6.9 ± 1.6	
	40 min	12.2 ± 2.1	12.1 ± 1.8	12.2 ± 1.9	Trial < 0.05
	55 min	9.5 ± 2.4	10.4 ± 2.0	11.8 ± 2.1*†	Time < 0.05
	60 min	11.8 ± 1.6	12.0 ± 1.6	12.7 ± 1.9	Interaction < 0.05
	65 min	12.3 ± 1.9	12.8 ± 1.9	12.8 ± 1.9	

n=12、平均値±標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、*3×30% RW* 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、*1×90% RW* 1 min of the cycling at 90% of VO_{2max} trial、*VO₂* oxygen uptake、*VCO₂* carbon dioxide production、*RER* respiratory exchange ratio、*HR* heart rate、*RPE* rating of perceived exertion

* vs コントロール試行 p < 0.05

† vs 3×30% RW 試行 p < 0.05

55-65 分間における 10 秒ごとの VO_2 、 VCO_2 、 RER を図 4-4 に示した。55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行の VO_2 は、それぞれ $28.5 \pm 4.0 \text{ ml/kg/min}$ 、 $29.6 \pm 4.5 \text{ ml/kg/min}$ 、 $29.2 \pm 4.8 \text{ ml/kg/min}$ であった。試行間には有意な差は認められなかった。55 分 10 秒から 55 分 30 秒における $3 \times 30\%$ RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 55 分 30 秒および 55 分 40 秒から 55 分 50 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の VO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 55 分 10 秒および 55 分 30 秒から 55 分 40 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の VO_2 は $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 4-4a)。

55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行の VCO_2 は、それぞれ $25.9 \pm 4.6 \text{ ml/kg/min}$ 、 $27.9 \pm 5.3 \text{ ml/kg/min}$ 、 $27.5 \pm 5.7 \text{ ml/kg/min}$ であった。 $3 \times 30\%$ RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 10 秒から 57 分 10 秒および 57 分 30 秒から 58 分 20 秒における $3 \times 30\%$ RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 57 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の VCO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 55 分 50 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の VCO_2 は $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 4-4b)。

55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行の RER は、それぞれ $0.90 \pm 0.05 \text{ A.U.}$ 、 $0.94 \pm 0.05 \text{ A.U.}$ 、 $0.94 \pm 0.06 \text{ A.U.}$ であった。 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行はコントロール試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 30 秒から 57 分 20 秒および 57 分 40 秒から 58 分 40 秒における $3 \times 30\%$ RW 試行の RER はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 57 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の RER

はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 56 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の RER は $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 4-4c)。

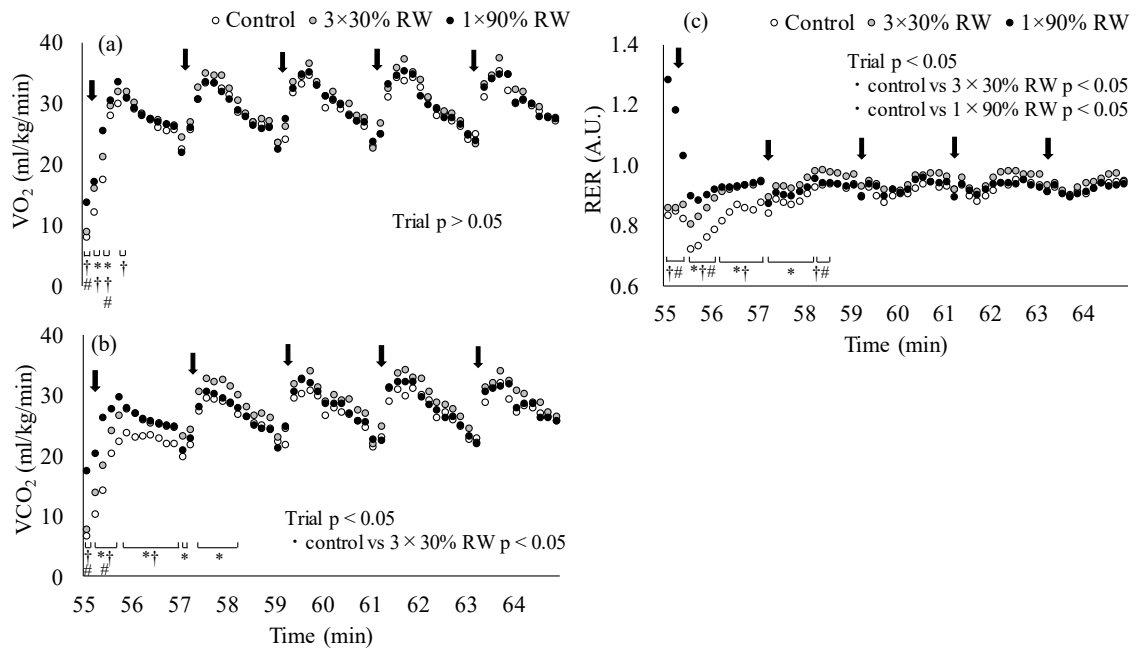


図 4-4 10 秒ごとの酸素摂取量 (a)、二酸化炭素排出量 (b)、呼吸交換比 (c)

n=12、平均値、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、 $3 \times 30\%$ RW 3 min of the cycling at 30% of VO_{2max} trial、 $1 \times 90\%$ RW 1 min of the cycling at 90% of VO_{2max} trial

エラーバーは明快さのために省略した。矢印は CISP 中のスプリントを示す。

VO_2 : 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

VCO_2 : 試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

RER : 試行の主効果 $p < 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs $3 \times 30\%$ RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs $1 \times 90\%$ RW 試行 $p < 0.05$

$3 \times 30\%$ RW 試行 vs $1 \times 90\%$ RW 試行 $p < 0.05$

第 4 項 筋酸素動態

pre、0-40 分、54-55 分間における $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 を表 4-3 に示した。pre、0-40 分における $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における $3 \times 30\% \text{ RW}$ 試行、 $1 \times 90\% \text{ RW}$ 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ および SmO_2 はコントロール試行と比較し、それぞれ有意な高値、有意な低値を示した ($p < 0.05$)。

表 4-3 各測定ポイントにおける筋酸素動態

		Control	$3 \times 30\% \text{ RW}$	$1 \times 90\% \text{ RW}$	p value
	Pre	-	-	-	Trial < 0.05
$\Delta\text{oxy-Hb}$ ($\mu\text{mol/L}$)	0-40 min	2.3 ± 4.6	1.3 ± 4.0	2.6 ± 4.5	Time < 0.05
	54-55 min	12.5 ± 5.3	8.3 ± 5.2	10.9 ± 5.2	Interaction > 0.05
	Pre	-	-	-	Trial < 0.05
$\Delta\text{deoxy-Hb}$ ($\mu\text{mol/L}$)	0-40 min	6.6 ± 2.4	7.4 ± 5.0	6.9 ± 5.9	Time < 0.05
	54-55 min	-3.6 ± 1.9	$2.0 \pm 3.3^*$	$4.8 \pm 5.8^*$	Interaction < 0.05
	Pre	-	-	-	Trial > 0.05
$\Delta\text{total-Hb}$ ($\mu\text{mol/L}$)	0-40 min	8.9 ± 3.5	8.7 ± 5.1	9.5 ± 5.1	Time > 0.05
	54-55 min	8.8 ± 5.1	10.3 ± 4.8	15.7 ± 6.9	Interaction < 0.05
	Pre	64.3 ± 4.8	65.4 ± 2.6	64.8 ± 4.5	Trial > 0.05
SmO_2 (%)	0-40 min	59.4 ± 6.5	58.5 ± 6.4	59.8 ± 6.7	Time < 0.05
	54-55 min	73.6 ± 5.0	$67.7 \pm 5.1^*$	$65.6 \pm 5.6^*$	Interaction < 0.05

n=9、平均値 \pm 標準偏差、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、 $3 \times 30\% \text{ RW}$ 3 min of the cycling at 30% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial、 $1 \times 90\% \text{ RW}$ 1 min of the cycling at 90% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial

* vs コントロール試行 $p < 0.05$

55-65 分間における 10 秒ごとの $\Delta\text{oxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ 、 $\Delta\text{total-Hb}$ 、 SmO_2 を図 4-5 に示した。55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\% \text{ RW}$ 試行、 $1 \times 90\%$

RW 試行の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値は、それぞれ $1.8 \pm 3.9 \mu\text{mol/L}$ 、 $3.0 \pm 4.7 \mu\text{mol/L}$ 、 $4.1 \pm 4.3 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間の有意な差は認められなかった。55 分 00 秒から 55 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の $\Delta\text{oxy-Hb}$ はコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 30 秒から 55 分 50 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の $\Delta\text{oxy-Hb}$ はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。(図 4-5a)。55-65 分間の CISP における 105 秒のアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の平均値は、コントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行でそれぞれ $1.3 \pm 4.0 \mu\text{mol/L}$ 、 $2.7 \pm 4.6 \mu\text{mol/L}$ 、 $3.4 \pm 4.4 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。

55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ の平均値は、それぞれ $6.8 \pm 2.8 \mu\text{mol/L}$ 、 $7.8 \pm 4.5 \mu\text{mol/L}$ 、 $7.5 \pm 6.6 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 00 秒から 55 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ はコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 4-5b)。

55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行の $\Delta\text{total-Hb}$ の平均値は、それぞれ $8.6 \pm 3.6 \mu\text{mol/L}$ 、 $10.7 \pm 4.7 \mu\text{mol/L}$ 、 $11.6 \pm 4.7 \mu\text{mol/L}$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 00 秒から 55 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の $\Delta\text{total-Hb}$ はコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 4-5c)。

55-65 分間におけるコントロール試行、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行の SmO_2 の平均値は、それぞれ $59.4 \pm 5.5 \%$ 、 $59.1 \pm 6.3 \%$ 、 $60.2 \pm 6.8 \%$ であった。試行間に有意な差は認められなかった。55 分 10 秒から 55 分 30 秒における $3 \times 30\%$ RW 試行の SmO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55 分 0 秒から 55 分 10 秒および 55 分 20 秒から 55 分 30 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の SmO_2 はコントロール試行と比較し有意な高値を示した ($p <$

0.05)。55 分 0 秒から 55 分 10 秒における $1 \times 90\%$ RW 試行の SmO_2 は $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$) (図 4-5d)。

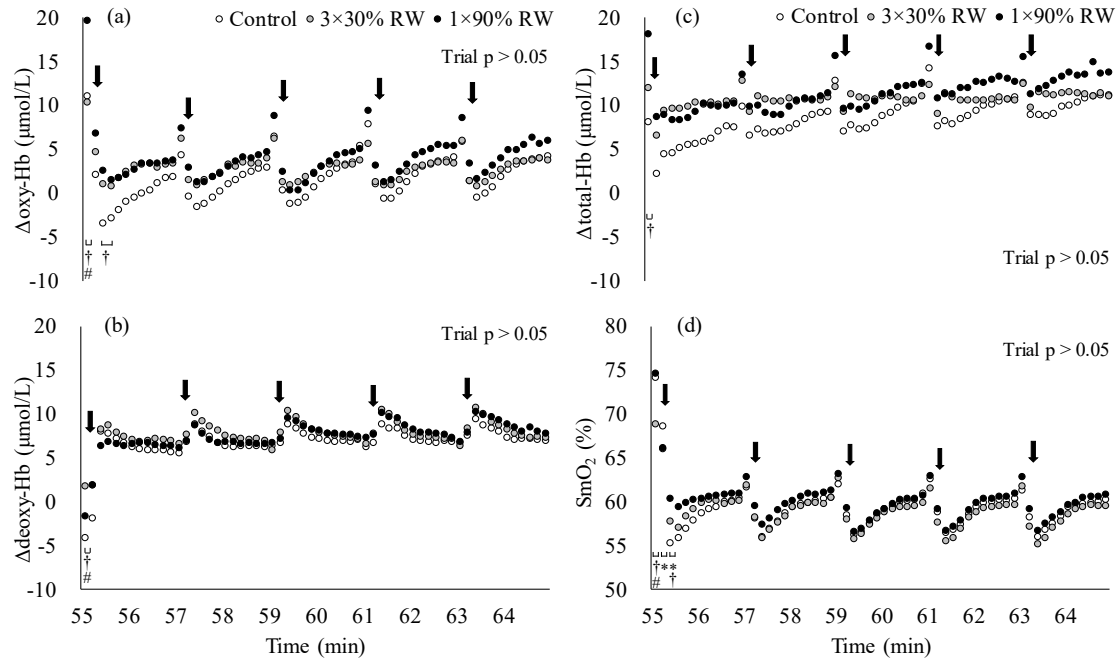


図 4-5 10 秒ごとの酸化ヘモグロビン濃度 (a)、脱酸化ヘモグロビン濃度 (b)、総ヘモグロビン濃度 (c) の安静時からの変化量および筋酸素飽和度 (b)

n=9、平均値、対応のある二元配置の分散分析

Control 15 min of seated rest trial、 $3 \times 30\%$ RW 3 min of the cycling at 30% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial、 $1 \times 90\%$ RW 1 min of the cycling at 90% of $\text{VO}_{2\text{max}}$ trial

エラーバーは明快さのために省略した。矢印は CISP 中のスプリントを示す。

$\Delta\text{oxy-Hb}$: 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

$\Delta\text{deoxy-Hb}$: 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

$\Delta\text{total-Hb}$: 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

SmO_2 : 試行の主効果 $p > 0.05$ 、時間の主効果 $p < 0.05$ 、交互作用 $p < 0.05$

* コントロール試行 vs $3 \times 30\%$ RW 試行 $p < 0.05$

† コントロール試行 vs $1 \times 90\%$ RW 試行 $p < 0.05$

$3 \times 30\%$ RW 試行 vs $1 \times 90\%$ RW 試行 $p < 0.05$

第 5 項 心拍数および主観的運動強度

各測定ポイントにおける平均心拍数を表 4-2 に示した。pre、0-40 分間における平均心拍数は試行間に有意な差は認められなかった。54-55 分間における 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行の平均心拍数はコントロール試行と比較し、有意な高値を示し ($p < 0.05$)、1×90% RW 試行の平均心拍数は 3×30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。55-65 分間における 1×90% RW 試行の平均心拍数はコントロール試行、3×30% RW 試行と比較し有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

各測定ポイントにおける RPE を表 4-2 に示した。55 分における 1×90% RW 試行の RPE はコントロール試行、3×30% RW 試行と比較し、有意な高値を示した ($p < 0.05$)。

第 4 節 考察

本研究ではエネルギー消費量を統一した異なる構成の RW がその後の間欠性スプリントパフォーマンスに与える影響を検討した。本研究の結果、ハーフタイムに 15 分間の安静を保った場合と比較し、CISP 開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスは 3 分間・30% VO_{2max} の強度の RW を実施した場合に 5.2%、1 分間・90% VO_{2max} の強度の RW を実施した場合に 5.7%有意に向上することが明らかとなった。この間欠性スプリントパフォーマンス上昇率は、第 2 章 (7 分間・70% HR_{max} : 4.1%、3 分間・70% HR_{max} : 4.7%)、第 3 章 (3 分間・60% VO_{2max} : 7.1%、3 分間・30% VO_{2max} : 4.2%) および先行研究 (Lovell ら 2013: 5.0%(30)、Mohr ら 2004: 4.0%(37)) で報告されている RW のスプリントパフォーマンス向上率とほぼ同様であった。さらに RW の強度によって筋活動に与える影響は異なり、30% VO_{2max} の強度の RW は筋放電量を上昇、90% VO_{2max} の強度の RW は周波数を上昇させることが明らかとなった。従って本研究の結果は、

1) RW の強度に関わらず、RW によって一定のエネルギー消費量を担保することと、その後の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させる可能性があること、2) RW の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果の大きさは強度に関わらず一定であること、3) RW の強度によって間欠性スプリントパフォーマンスが向上するメカニズムは異なる可能性があることを示している。

近年の RW に関する総説によると、RW が運動パフォーマンスの改善に寄与するメカニズムとして最も重要な要因の一つは、ハーフタイム中の深部体温、筋温の低下抑制である(15,51,54)。例えば、Mohr らはハーフタイム後のスプリントパフォーマンスの低下率はハーフタイム中の筋温の低下と関連があり ($r=0.6$)、7 分間・70% HR_{max} の RW を実施することでハーフタイム中の筋温の低下を抑制できることを明らかにしている(37)。本研究では 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行共にハーフタイム中の深部体温・筋温の低下抑制効果は有していなかった (図 4-3)。この理由は先行研究と比較し、本研究の RW の運動時間及び強度が深部体温、筋温維持のために十分でなかったことが挙げられる。運動による深部体温、筋温の上昇は運動強度および時間に依存する(45)。先行研究で用いられている 7 分間・70% HR_{max} の強度の RW と比較し(37)、3×30% RW 試行では強度・時間それぞれ低強度・短時間であり、1×90% RW 試行は強度が高いものの、時間は短い。従って、本研究の RW ではハーフタイム中の深部体温、筋温の低下抑制に十分な運動時間・強度ではなかった可能性がある。一方で、65 分の Δ 推定筋温は 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行でコントロール試行と比較し有意な高値を示し、また 1×90% RW 試行は 3×30% RW 試行と比較し、高値を示す傾向が示された。これは RW の筋温の再上昇効果か RW によって間欠性スプリントパフォーマンスが高まったことによる筋温の再上昇なのか明らかではない。しかし、筋温の上昇は運動パフォーマンス向上効果のみならず(4)、非接触型の負傷リスクの低減にも寄与するため(66)、3×30% RW 試行、

1×90% RW 試行が CISP 中の筋温の再上昇に寄与する可能性があることは重要な知見であると考えられる。また筋温の上昇は特に運動強度の影響を強く受けるため(67)、1×90% RW 試行が 3×30% RW 試行と比較し、より高い筋温の再上昇効果を有していた可能性が考えられる。

本研究で 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行がコントロール試行と比較し、間欠性スプリントパフォーマンスを向上させたメカニズムの一つは、RW による筋活性の向上が考えられる。本研究において第 3 章で示した結果とほぼ同様に、コントロール試行と比較して 3×30% RW 試行では RMS から評価した筋放電量が上昇する傾向が認められた。サイクリングスプリント中の RMS はパワー出力と正の相関関係があることが報告されており(21)、3×30% RW 試行におけるスプリント中の RMS の向上が間欠性スプリントパフォーマンスの向上に寄与した可能性がある。3×30% RW 試行における RMS の上昇の明確なメカニズムは本研究では明らかにできない。しかし、主運動直前の筋収縮は運動皮質の興奮性の向上によってその後の運動誘発電位を上昇させることが示されているため(2)、RW による運動皮質の興奮性の向上が RMS の向上のメカニズムの一つである可能性が考えられる。

1×90% RW 試行ではコントロール試行と比較し、MDF の有意な上昇が認められた。筋電図の周波数分析は MFCV を反映することが報告されているため(57)、本研究における 1×90% RW 試行の MDF の有意な上昇は、RW によって MFCV が高値を示していたことを示唆している可能性が考えられる。MFCV は動員順序のより高い運動単位の動員が増加した場合もしくは筋温、皮膚温が上昇した場合に高値を示すことが知られている(27,39,52)。本研究において、直腸温は試行間に有意な差は認められず、推定筋温、皮膚温は 3×30% RW 試行、1×90% RW 試行共に 60 分、65 分で有意な高値を示した（表 4-1）。本研究における推定筋温、皮膚温の上昇は MFCV の上昇に寄与している可能性はあるもの

の、MDF は $3 \times 30\%$ RW 試行においてコントロール試行と比較し有意な差が認められないことから、本研究においては体温の上昇が MDF の変化に最も寄与していた要因であるとは考えづらい。一方、動員順序のより高い運動単位の動員はウォーミングアップによって増加し、その結果スプリントパフォーマンスが向上する可能性が報告されている(61)。この現象は PAP と定義されており、PAP を引き起こすためには、ウォーミングアップとして $60-84\%$ 1RM の強度の筋収縮を行うことが最も効果的であることが報告されている(64)。本研究で用いた 90% VO_{2max} の強度の RW が 1RM のどの強度に相当するかは不明であり、また先行研究とは異なりハーフタイムの前に 40 分間の運動を実施しているため、本研究における MDF の上昇が PAP に起因する動員順序のより高い運動単位の動員の増加なのか明らかにすることはできない。しかし先行研究では、より強度の低い $25-35\%$ 1RM の強度の筋収縮を用いた場合でも PAP が引き起こされる可能性が示されており(55)、 $1 \times 90\%$ RW による間欠性スプリントパフォーマンスの向上が PAP に起因するのか今後の研究が望まれる。

本研究における 54-55 分及び CISP 開始直後の VO_2 は、 $3 \times 30\%$ RW 試行、 $1 \times 90\%$ RW 試行でコントロール試行と比較し有意な高値を示し、さらに $1 \times 90\%$ RW 試行は $3 \times 30\%$ RW 試行と比較し有意な高値を示した(図 4-4、表 4-2)。運動開始前および開始直後の VO_2 を上昇させることは、運動開始直後の好気性代謝を亢進させることで運動終盤のための嫌気性代謝の温存に繋がり、持久性運動パフォーマンスを向上させる可能性がある(4,33)。さらに持久性運動パフォーマンスの向上のためには、ウォーミングアップとして乳酸性作業閾値を超える高強度の運動を実施し、運動開始直後の好気性代謝の貢献度をより高めることが重要である可能性が示されている(23,33)。実際に本研究と比較し運動時間および強度は異なるものの、RW が持久性運動パフォーマンスを向上させる可能性は先行研究で示されている(31,69)。従って、本研究の結果は $3 \times 30\%$ RW 試

行、1×90% RW 試行がその後の持久性運動パフォーマンスを向上させる可能性を有しており、またその効果は 1×90% RW 試行がより高い可能性があることを示している。

本研究では、1 分間・90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW が 3 分間・30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW と同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有していることを明らかにした。1 分間・90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW プロトコルは 3 分間・30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW プロトコルと比較し、3 つのメリットがあると考えられる。1 つは運動時間がより短い点である。Towlson らによると、RW を選手に実施させているイングランド・プレミアリーグ、チャンピオンシップのフィジカルコーチは約半数であり、スポーツ現場での RW の応用が約半数である要因はハーフタイムにおける RW のための時間不足である(62)。一般的に選手はハーフタイム中に戦術ミーティング、医療および栄養学的サポートに多くの時間を消費し、それらに付け加えてビデオ映像を使用したフィードバック、着衣・用具などの交換、選手の私的な準備などを行っている(62)。従って、RW のための時間的制約があるスポーツ現場への応用を考慮すると、後半開始直後の運動パフォーマンスの維持もしくは向上に寄与する RW プロトコルを明らかにしたことは重要な知見であると考えられる。また 2 つ目のメリットは、嫌気性代謝を温存し、間欠性スプリントパフォーマンスを向上させていることである。CISP 中の VCO_2 は 3×30% RW 試行でのみコントロール試行と比較し有意な高値を示している(図 4-4)。すなわち、1×90% RW 試行は 3×30% RW 試行と比較し、同様の間欠性スプリントパフォーマンスを発揮しているが、スプリント中の嫌気性代謝を温存している可能性がある。間欠性チームスポーツにおいて、嫌気性代謝が試合終了前に減少することによって、運動パフォーマンスが低下する(36)。従って、嫌気性代謝の消費を後半開始直後に抑えることは重要であり、1×90% RW 試行は間欠性スプリントパフォーマンスを向上させるが、コントロール試

行と VCO_2 に有意差が認められない結果は重要な知見であると考えられる。3 つ目は、スプリント後の活動筋における酸素利用性を向上させている可能性があることである。CISP 開始直後の $\Delta\text{oxy-Hb}$ は、 $1 \times 90\%$ RW 試行でコントロール試行と比較し有意な高値を示した (図 4-5)。活動筋における酸素利用性は間欠性スプリントパフォーマンスを維持もしくは向上させるための重要な要因の一つである(13)。活動筋における酸素利用性を向上させることは、スプリントなどの高強度運動で減少した PCr の再合成を促進させる(16,32,56)。第 2 章では CISP におけるアクティブリカバリー中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ は、間欠性スプリントパフォーマンスと正の相関関係があることを明らかにしており、運動パフォーマンスに寄与する可能性もある。一方で、1 分間・ $90\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は 3 分間・ $30\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW と比較し、55 分の RPE が有意な高値を示した。RW をスポーツ現場で行わない理由の一つに、選手の主観的な問題も含まれているため(62)、1 分間・ $90\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW の実施にはより大きな尽力が必要であることも重要な結果である。しかし、 $1 \times 90\%$ RW 試行における 55 分の RPE の平均値はおおよそ 12 であり、これは「楽である」と「ややきつい」の間の値であるため、主観的な観点から RW プロトコルの実施が難しいことは示唆されない。従って、スポーツ現場においては、RW のために確保できる時間によって 3 分間・ $30\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度もしくは 1 分間・ $90\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW プロトコルを使い分けることが推奨されることが考えられる。

第 5 節 結論

本研究の目的は同一エネルギー消費量である 1 分間・ $90\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW と 3 分間・ $30\% \text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW が同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有するか否かを明らかにすることであった。本研究の結果、これらの RW は同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有することが明ら

かとなった。また、RW の運動時間、CISP 中の $\dot{V}CO_2$ 、CISP 開始直後におけるスプリント後の $\Delta oxy-Hb$ より 1 分間・ $90\%VO_{2max}$ の強度の RW がスポーツ現場での応用に有効である可能性が示された。

第 5 章

総合考察

第 1 節 RW プロトコルと高強度運動パフォーマンス向上効果

第 2 章では RW の運動時間に着目し、運動パフォーマンス向上効果が認められると多くの先行研究で報告されている 7 分間の RW と比較し、同強度で実施する 3 分間の RW は同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有することが明らかとなった。第 3 章では RW の運動強度に着目し、第 2 章で運動パフォーマンス向上効果が認められた 3 分間・60% VO_{2max} の強度の RW と比較し、同時間で実施する 30% VO_{2max} の強度の RW は同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有することが明らかとなった。第 4 章では RW の時間および強度の構成に着目し、第 3 章で運動パフォーマンス向上効果が認められた 3 分間・30% VO_{2max} の強度の RW と比較し、エネルギー消費量が同一であると推察される 1 分間・90% VO_{2max} の強度の RW は同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有することが明らかとなった。第 4 章で時間と強度の構成を変えた場合に 2 つの RW プロトコルは同様の間欠性スプリントパフォーマンスの向上を示したことから、RW はその時間や強度に依存せず、ある一定のエネルギー消費量以上の運動を実施することで間欠性スプリントパフォーマンスの向上効果を発揮することが示唆された。さらに、第 2 章から第 4 章で用いた 2 つの RW 試行間に全ての研究で有意な差が認められなかったことから、第 2 章から第 4 章で用いた全ての RW プロトコルは同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を有する可能性が示唆された。この 2 つの知見から、1) 90% VO_{2max} の運動を 1 分間実施した際のエネルギー消費量以上の運動を実施することで、その時間や強度に関わらず、RW は間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を発揮する可能性があること、2) RW の時間を延長もしくは強度を向上させる

ことにより、RW 中のエネルギー消費量を増やしたとしても、追加的な間欠性スプリントパフォーマンス向上効果は得られないことの 2 点が推察される。また、第 2 章から第 4 章で述べたように、本研究で用いた RW プロトコルが示した間欠性スプリントパフォーマンス向上効果は、先行研究で報告されてきた RW プロトコルと同等であった。走運動でスプリントパフォーマンスを評価している多くの RW に関する先行研究とは異なり、本研究では自転車運動でスプリントパフォーマンスを評価しているため、本研究と先行研究で RW プロトコルが有する間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を厳密に比較することはできない。しかし、自転車運動と走運動におけるスプリントパフォーマンスは中程度の正の相関関係が認められることが報告されており(12)、本研究で用いた RW プロトコルが有する間欠性スプリントパフォーマンス向上効果が走運動の用いた場合でも同様の効果を発揮するか今後の検討が望まれる。

第 3 章および第 4 章より、本研究における間欠性スプリントパフォーマンス向上のメカニズムは、ハーフタイム中の筋温の維持ではなく筋活性の向上の可能性が考えられる。Mohr らがハーフタイム前後でのスプリントパフォーマンスの低下はハーフタイム中の筋温の低下と正の相関関係 ($r=0.6$) があることを報告したことから(37)、先行研究ではハーフタイム中の深部体温および筋温の維持を目的に RW プロトコルが検討されてきた。一方、本研究において筋活性の向上が間欠性スプリントパフォーマンス向上のメカニズムである可能性が示されたことから、筋活性の向上を目的とした RW をハーフタイム中に実施した場合も間欠性スプリントパフォーマンスを向上させることが示唆された。主運動前のウォーミングアップとは異なり、ハーフタイム開始時には前半の運動によって体温が高まっているため、ハーフタイム中の体温の低下抑制は外部保温器具を着用することで達成できる可能性が考えられる(49)。一方で筋の活性化や増強のためには運動を伴う必要があり、またハーフタイムにおける体温の低下

抑制のためには短時間の運動では不十分であることを考慮すると、RW は筋活性の向上を目的とし実施することが重要であると考えられる。

第 2 章では、RW の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果は後半開始後 10 分程度で消失し、試合終了前のスプリントパフォーマンスには影響を与えないことを明らかにした。サッカーの試合中に高強度運動量が低下するピリオドの一つに試合終了前の 15 分間が含まれていることから(36)、RW が試合終了前の運動パフォーマンスに影響を与えないことは重要な知見である。第 2 章で得られた結果は、RW は試合終了前の運動パフォーマンスには影響を与えないことを示した 2 つの先行研究と同様の結果となった(30,37)。この 2 つの先行研究では、5 分間または 7 分間の 70% HR_{max} の強度の RW を用いており(30,37)、本研究で用いた RW プロトコルよりもエネルギー消費量が高いことが推察される。またそれぞれの研究の後半開始後のスプリントパフォーマンスの向上率も本研究とほぼ同様であることから、第 3 章および第 4 章では後半開始後 10 分以降の間欠性スプリントパフォーマンスを評価していないものの、先行研究や第 2 章と同様に間欠性スプリントパフォーマンスはハーフタイムに安静を保った場合と同等になることが予想される。

第 2 節 RW の高強度運動パフォーマンス向上効果の個人差

RW に関する先行研究では、その競技レベルや役割に関わらず、運動を伴った RW を実施することによって運動パフォーマンスが向上することが明らかとなっている(11,15,30,31,37,49,50,54,69,71)。しかし、被験者のフィットネスレベルで RW の効果を検討した報告はなく、被験者のフィットネスレベルが RW の運動パフォーマンス向上効果に影響を与えるか明らかではない。そこで、第 2 章から第 4 章で得られたデータを用いて被験者のフィットネスレベルと RW の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果の関係を検討した (図 5-1)。すなわ

ち、有酸素能力の指標として VO_{2max} 、スプリント能力としてコントロール試行で得られた 5 秒のスプリント中の最大仕事量と RW の間欠性スプリントパフォーマンス向上率をピアソンの積率相関係数を用い、これらの相関関係を検討した。RW の間欠性スプリントパフォーマンス向上率は各試験における 2 つの RW 試行の CISP 開始後 10 分間の向上率を平均し、算出した。その結果、第 2 章 (a、b)、第 3 章 (c、d)、第 4 章 (e、f) および第 2 章から第 4 章の合算 (g、h) の 4 つ全ての解析で VO_{2max} および最大スプリント仕事量と RW の間欠性スプリントパフォーマンス向上率の間に有意な相関関係は認められなかった。この結果は、相対的な運動強度を揃えた RW プロトコルを実施した場合、個人のフィットネスレベルに関わらず同一の運動パフォーマンス向上効果を期待できる可能性を示唆している。

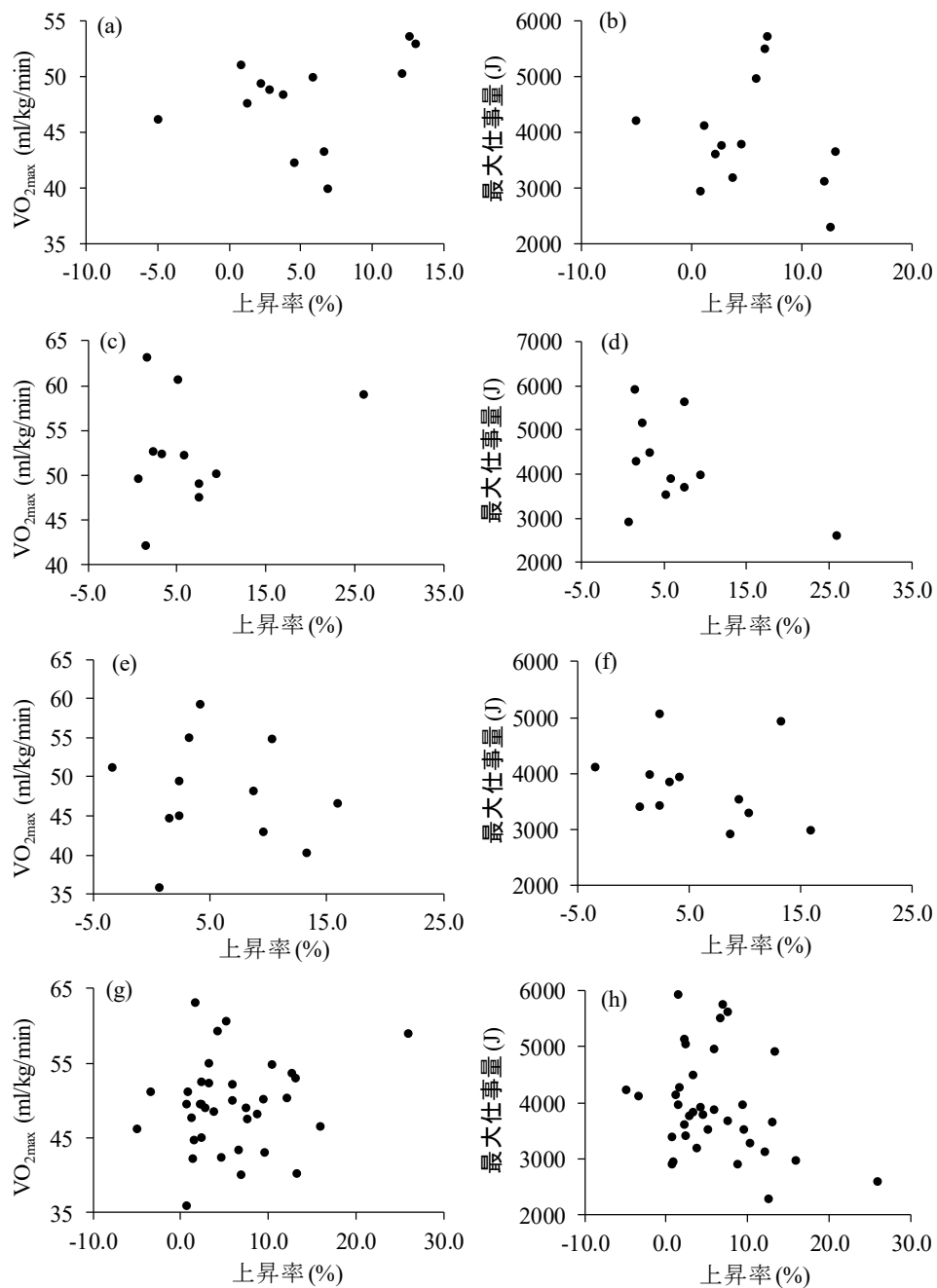


図 5-1 第 2 章 (a、b)、第 3 章 (c、d)、第 4 章 (e、f) および第 2 章から第 4 章の合算 (g、h) における被験者のフィットネスレベルと間欠性スプリントパフォーマンス向上率の関係

第 3 節 RW プロトコルと生理学的指標

先行研究によると、ウォーミングアップによる生理学的反応は体温に関連した効果、代謝に関連した効果、筋活動に関連した効果の 3 つに分類される(33)。

そのため、本論文では RW がそれらの生理学的指標に与える影響を総合的に検討した。

体温に着目すると、ハーフタイム前後でのスプリントパフォーマンスの低下はハーフタイム中の筋温の低下と正の相関関係 ($r=0.6$) があることから、ハーフタイム中に筋温を維持することが重要である(37)。本研究の第 2 章から第 4 章で検討した 3 分以下の RW プロトコルはハーフタイム中の皮膚温から推定した筋温の低下抑制効果は有していなかった。筋収縮による筋内の熱産生量は運動に伴う代謝エネルギー量に依存する(73)。従って、本研究で用いた RW プロトコルでは総エネルギー消費量が不十分であった可能性が推察される。筋温を上昇させるためには、3 分間・60% VO_{2max} の RW プロトコルを行った場合よりも RW 中のエネルギー消費量を高める必要がある。RW 中のエネルギー消費量を高めるためには、RW の時間を延長させるもしくは強度を高める必要がある。現場応用の観点から RW の運動時間を延長させることは好ましくなく、また運動強度を向上させると追加的な疲労を誘発する可能性もある。先行研究において、外部温熱用具を用いることでハーフタイム中の筋温の低下を抑制する可能性が報告されており、実際に Russell らは、外部温熱器具の着用が 7 分間・心拍数 135 拍/分程度の RW による Repeated shuttle sprint パフォーマンスの向上をさらに促進することを明らかにしている(49)。従って、ハーフタイム中の体温の低下抑制のためには、RW による能動的な方法ではなく、外部温熱用具を用いた受動的な方法を用いることが推奨される可能性がある。

代謝に着目すると、持久性運動パフォーマンスの向上には運動開始前および開始直後の VO_2 を向上させること(4,5,33)、高強度運動パフォーマンスの維持には高強度運動後の筋内の酸素利用性を高めることが重要である(13,16,32)。ウォーミングアップを行い、運動開始前および開始直後の VO_2 を向上させるためには高強度のウォーミングアップを行うことが推奨されており、強度が低すぎる

場合 (40% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 以下)、運動開始前の VO_2 は上昇しない可能性が示されている(4,5)。本研究の第2章から第4章において、低強度から高強度のすべてのRWでCISP開始前(54-55 min)の VO_2 の上昇が認められ、高強度のRWが最も VO_2 の上昇効果が高かった(表2-1、3-1、4-2)。ウォーミングアップに関する先行研究と異なり、30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度のRWでも VO_2 の上昇が認められた理由の一つは、RW終了からCISP開始までの時間が1分間と短かったことが考えられる。高強度でウォーミングアップを実施した場合、ウォーミングアップから競技開始まで5分間以上の休息を保つことにより、ウォーミングアップによって上昇した VO_2 は安静状態まで低下する(4,5)。この低下を最小限にするためには、ウォーミングアップから競技開始までの時間を短縮することが重要であるため、RW終了からCISP開始までの時間が1分間と短かったことが VO_2 の上昇のためには重要であった可能性が考えられる。また第2章からCISP開始後10分間の間欠性スプリントパフォーマンスとスプリント後の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の正の相関関係が認められ、スプリント後の $\Delta\text{oxy-Hb}$ が間欠性スプリントパフォーマンスと関連があることが明らかとなった。本研究におけるスプリント中のRMSやスプリント後の $\Delta\text{deoxy-Hb}$ から、本研究におけるRW試行でスプリント後の $\Delta\text{oxy-Hb}$ が高値を示した理由は、活動筋への酸素供給の増加である可能性が高い。ウォーミングアップによる活動筋への酸素供給の増加は、主に筋血流量の増加およびボア効果による酸素解離曲線の右傾化である(4)。本研究のCISP中の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の変動をみると、CISP開始後早い時間にRW試行とコントロール試行との差が大きい(図2-4、3-5、4-5)。第3章および第4章より、推定筋温はCISP開始前(55 min)に試行間で有意な差が認められないことから、スプリント後の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の増加はボア効果による酸素解離曲線の右傾化よりも筋血流量の増加による可能性が考えられる。RWの強度に着目すると、本研究の第4章よりCISP開始直後の $\Delta\text{oxy-Hb}$ の上昇効果は3×30% RW試行と比較し1×90% RW

試行が高かった（図 4-5）。ウォーミングアップの強度とその後の運動中の筋酸素動態を検討した先行研究でも、高強度のウォーミングアップが $\Delta\text{oxy-Hb}$ を高めることが報告されている(65)。従って、後半開始前および直後の VO_2 の上昇、高強度運動後の酸素供給量を高めるためには、1) より強度の高い RW を実施すること、2) 後半開始直前に RW を実施することが重要である可能性が考えられる。

これまでの RW に関する先行研究では、筋活動に着目した報告はなく本研究の第 3 章から第 4 章は RW による筋活動への影響を明らかにした初めての報告となる。本研究の結果、ハーフタイムに安静を保った場合と比較し、30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は活動筋の筋放電量を上昇させ、90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW は MDF を上昇させた。これまでの RW に関する先行研究では体温を維持することのみが重要であると示されてきたが、本研究の結果から体温を維持することのみならず、ハーフタイム中に筋活性を高めることが後半開始後の間欠性スプリントパフォーマンスを維持もしくは向上させるために重要である可能性が示された。筋活性を高めるウォーミングアップ方法として PAP が知られており、PAP を引き起こすためには 60–84% 1RM の強度のコンディショニング収縮を行うことが最も効果的であることが知られている(64)。コンディショニング収縮は数回の筋収縮で終了することから、第 4 章で検討した 1 分間の RW よりも短時間で終了することが推察される。RW がスポーツ現場で応用困難である理由が RW のための時間の不足であることから(62)、より短時間で終了する RW プロトコルを検討することは非常に重要な課題であると考えられる。従って、本研究によってハーフタイム中に筋活性を高めることの重要性が明らかになったことは今後 RW プロトコルを検討していくうえで重要な知見の一つであると考えられる。さらに、第 4 章より 30% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 、90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW とも同様の間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を示している一方、筋放電量は 30% $\text{VO}_{2\text{max}}$

の強度の RW と比較し、90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW で低値を示している。これは 90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW を実施した場合、少ない筋活動で効率の良い運動パフォーマンスの発揮ができていることを示している。強度に関わらず間欠性スプリントパフォーマンス向上効果は同一であるが、筋活動がより少ないことから、筋活性の向上を目的とした場合、本研究で検討した RW プロトコルの中では 1 分間・90% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度の RW が有効である可能性が考えられる。

第 4 節 今後の展望

これまで述べてきた通り、後半開始後の間欠性スプリントパフォーマンスの維持または向上を目的とした RW プロトコルは、一定のエネルギー消費量を担保することに加えて、エネルギー代謝および筋活動の観点から高強度の RW を後半開始直前に実施することが重要であると考えられる。本研究では、高強度運動パフォーマンスに対して RW が与える影響を検討したが、高強度運動の重要性はポジションによって異なる。例えば、試合の勝敗と高強度運動量を検討した研究では、フォワードおよびサイドアタッカーは勝利した試合で敗北した試合と比較し有意に高いが、センターバックやセントラルミッドフィールダーは逆に有意に低いことが報告されている(9)。さらに本研究では自転車運動を用いており、走運動で同様の結果が得られるか不明である。従って、RW が各ポジション別に重要な運動パフォーマンスに与える影響について走運動を用いて評価する必要があると考えられる。

また本研究から得られた知見は全て通常環境下で検討された結果であり、環境が変化することで環境に適した RW プロトコルが必要となる可能性が考えられる。例えば、寒冷環境であれば体温が通常環境下よりも低下しやすく、体温保持のためにより長時間・高強度の RW または外部保温用具と併用する RW が推奨される可能性が考えられる。また暑熱環境下では、過度な深部体温上昇が

試合終了前の運動パフォーマンスの低下の主な要因であるため(45)、体温に影響を与えないもしくは冷却と併用する RW を検討する必要があると考えられる。従って、環境が異なる場合の適切な RW プロトコルを検討する必要があると考えられる。

第 6 章

結論

本論文では球技系競技における後半開始直後の高強度運動パフォーマンスの維持もしくは向上に効果的な短時間の RW プロトコルおよび RW が高強度運動パフォーマンスに影響を与えるメカニズムを明らかにすることを目的とした。本研究の結果、以下の結論が得られた。

- 7 分間・70% HR_{max} 、3 分間・70% HR_{max} 、60% VO_{2max} および 30% VO_{2max} 、1 分間・90% VO_{2max} の強度で行う RW は、ハーフタイム中に安静を保った場合と比較し、自転車運動で評価した後半開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させること。
- RW はその強度、時間に関わらず、90% VO_{2max} の強度の運動を 1 分間実施した場合以上のエネルギーを消費するプロトコルを設定することで、後半開始後 10 分間の間欠性スプリントパフォーマンスを向上させ、エネルギー消費量を上昇させても追加的な間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を得られない可能性があること。
- RW はハーフタイムにおける深部体温および筋温の低下の抑制以外に、筋活性を高める目的で実施した場合にも間欠性スプリントパフォーマンス向上効果を発揮すること。
- RW は後半開始前および開始直後の VO_2 、高強度運動後の酸素利用率を向上させ、そのエネルギー代謝の亢進効果は高強度の RW がより大きいこと。

これらの知見より、スポーツ現場において後半開始直後の高強度運動パフォーマンスの維持もしくは向上のためには、RW のために確保できる時間によって、本研究で検討した RW プロトコルの中で最も運動時間が短い 1 分間・90%

VO_{2max} もしくは最も運動強度が低い 3 分間・30% VO_{2max} の強度で行う RW を使い分けることが推奨されると考えられる。

参考文献

1. American College of Sports Medicine. ACSM's resource manual for guidelines for exercise testing and prescription. 2010.
2. Balbi, P, Perretti, A, Sannino, M, Marcantonio, L, and Santoro, L. Postexercise facilitation of motor evoked potentials following transcranial magnetic stimulation: A study in normal subjects. *Muscle Nerve* 25: 448–452, 2002.
3. Bangsbo, J, Mohr, M, and Krstrup, P. Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *J Sports Sci* 24: 1–18, 2006.
4. Bishop, D. Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Med* 33: 439–454, 2003.
5. Bishop, D. Warm up II: performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Med* 33: 483–498, 2003.
6. Borg, GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14: 377–81, 1982.
7. Bot, S and Hollander, A. The relationship between heart rate and oxygen uptake during non-steady state exercise. *Ergonomics* 43: 1578–1592, 2000.
8. Bradley, PS, Sheldon, W, Wooster, B, Olsen, P, Boanas, P, and Krstrup, P. High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *J Sports Sci* 27: 159–168, 2009.
9. Chmura, P, Konefał, M, Chmura, J, Kowalczyk, E, Zajac, T, Rokita, A, et al. Match outcome and running performance in different intensity ranges among elite soccer players. *Biol Sport* 35: 197–203, 2018.
10. Dupont, G, McCall, A, Prieur, F, Millet, GP, and Berthoin, S. Faster oxygen uptake kinetics during recovery is related to better repeated sprinting ability.

- Eur J Appl Physiol* 110: 627–634, 2010.
11. Edholm, P, Krstrup, P, and Randers, MB. Half-time re-warm up increases performance capacity in male elite soccer players. *Scand J Med Sci Sport* 25: e40–e49, 2015.
 12. Fitzsimons, M, Dawson, B, Ward, D, and Wilkinson, A. Cycling and running tests of repeated sprint ability. *Aust J Sci Med Sport* 25: 82–87, 1993.
 13. Girard, O, Mendez-Villanueva, A, and Bishop, D. Repeated-sprint ability - part I: factors contributing to fatigue. *Sports Med* 41: 673–694, 2011.
 14. Glaister, M. Multiple sprint work: Physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med* 35: 757–777, 2005.
 15. Hammami, A, Zois, J, Slimani, M, Russel, M, and Bouhlef, E. The efficacy, and characteristics, of warm-up and re-warm-up practices in soccer players: a systematic review. *J Sports Med Phys Fitness* 58: 135–149, 2018.
 16. Haseler, LJ, Hogan, MC, and Richardson, RS. Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *J Appl Physiol* 86: 2013–2018, 1999.
 17. Hayes, M, Smith, D, Castle, PC, Watt, PW, Ross, EZ, and Maxwell, NS. Peak power output provides the most reliable measure of performance in prolonged intermittent-sprint cycling. *J Sports Sci* 31: 565–572, 2013.
 18. Herda, T, Cramer, J, Ryan, E, McHugh, M, and Stout, J. Acute effects of static versus dynamic stretching on isometric peak torque, electromyography, and mechanomyography of the biceps femoris muscle. *J Strength Cond Res* 22: 809–817, 2008.
 19. Hough, PA, Ross, EZ, and Howatson, G. Effects of dynamic and static stretching on vertical jump performance and electromyographic activity. *J*

- Strength Cond Res* 23: 507–512, 2009.
20. Howard, RM, Conway, R, and Harrison, AJ. Muscle activity in sprinting: a review. *Sport Biomech* 17: 1–17, 2018.
 21. Hug, F and Dorel, S. Electromyographic analysis of pedaling: A review. *J Electromyogr Kinesiol* 19: 182–198, 2009.
 22. Jones, AM, Koppo, K, Burnley, M, and Carter, H. Effects of Prior Exercise on Metabolic and Gas Exchange Responses to Exercise. *Sports Med* 33: 949–971, 2003.
 23. Jones, AM, Wilkerson, DP, Burnley, M, and Koppo, K. Prior heavy exercise enhances performance during subsequent perimaximal exercise. *Med Sci Sports Exerc* 35: 2085–2092, 2003.
 24. Kilduff, LP, Owen, N, Bevan, H, Bennett, M, Kingsley, M, and Cunningham, D. Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *J Sports Sci* 26: 795–802, 2008.
 25. Krustrup, P, Mohr, M, and Bangsbo, J. Activity profile and physiological demands of top-class soccer assistant refereeing in relation to training status. *J Sports Sci* 20: 861–871, 2002.
 26. Krustrup, P, Mohr, M, Steensberg, A, Bencke, J, Kjaer, M, and Bangsbo, J. Muscle and blood metabolites during a soccer game: Implications for sprint performance. *Med Sci Sports Exerc* 38: 1165–1174, 2006.
 27. Kupa, E, Roy, S, Kandarian, S, and De Luca, C. Effects of muscle fiber type and size on EMG median frequency and conduction velocity. *J Appl Physiol* 79: 23–32, 1995.
 28. Lockie, RG, Lazar, A, Davis, DL, and Moreno, MR. Effects of postactivation potentiation on linear and change-of-direction speed: analysis of the current

- literature and applications for the strength and conditioning coach. *Strength Cond J* 40: 75–91, 2018.
29. Lovell, R, Barrett, S, Portas, M, and Weston, M. Re-examination of the post half-time reduction in soccer work-rate. *J Sci Med Sport* 16: 250–254, 2013.
 30. Lovell, R, Midgley, A, Barrett, S, Carter, D, and Small, K. Effects of different half-time strategies on second half soccer-specific speed, power and dynamic strength. *Scand J Med Sci Sport* 23: 105–113, 2013.
 31. Lovell, RJ, Kirke, I, Siegler, J, Mcnaughton, LR, and Greig, MP. Soccer half-time strategy influences thermoregulation and endurance performance. *J Sports Med Phys Fitness* 47: 263–269, 2007.
 32. McCully, KK, Iotti, S, Kendrick, K, Wang, Z, Posner, JD, Leigh, J, et al. Simultaneous in vivo measurements of HbO₂ saturation and PCr kinetics after exercise in normal humans. *J Appl Physiol* 77: 5–10, 1994.
 33. McGowan, CJ, Pyne, DB, Thompson, KG, and Rattray, B. Warm-up strategies for sport and exercise: Mechanisms and applications. *Sports Med* 45: 1523–1546, 2015.
 34. Miura, H, Araki, H, Matoba, H, and Kitagawa, K. Relationship among oxygenation, myoelectric activity, and lactic acid accumulation in vastus lateralis muscle during exercise with constant work rate. *Int J Sports Med* 21: 180–184, 2000.
 35. Mohr, M, Krstrup, P, and Bangsbo, J. Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *J Sports Sci* 21: 519–528, 2003.
 36. Mohr, M, Krstrup, P, and Bangsbo, J. Fatigue in soccer: A brief review. *J Sports Sci* 23: 593–599, 2005.

37. Mohr, M, Krstrup, P, Nybo, L, Nielsen, JJ, and Bangsbo, J. Muscle temperature and sprint performance during soccer matches - Beneficial effect of re-warm-up at half-time. *Scand J Med Sci Sport* 14: 156–162, 2004.
38. Mohr, M, Mujika, I, Santisteban, J, Randers, MB, Bischoff, R, Solano, R, et al. Examination of fatigue development in elite soccer in a hot environment: A multi-experimental approach. *Scand J Med Sci Sport* 20: 125–132, 2010.
39. Morimoto, S, Umazume, Y, and Masuda, M. Properties of spike potentials detected by a surface in intact human muscle. *Jpn J Physiol* 30: 71–80, 1980.
40. Mugglestone, C, Morris, J, Saunders, B, Sunderland, C, and Lane, C. Half-time and high-speed running in the second half of soccer. *Int J Sport Medicine* 34: 514–519, 2013.
41. Nassis, GP, Brito, J, Dvorak, J, Chalabi, H, and Racinais, S. The association of environmental heat stress with performance: Analysis of the 2014 FIFA World Cup Brazil. *Br J Sports Med* 49: 609–613, 2015.
42. Niwayama, M, Lin, L, Shao, J, Kudo, N, and Yamamoto, K. Quantitative measurement of muscle hemoglobin oxygenation using near-infrared spectroscopy with correction for the influence of a subcutaneous fat layer. *Rev Sci Instrum* 71: 4571–4575, 2000.
43. Niwayama, M, Suzuki, H, Yamashita, T, and Yasuda, Y. Error factors in oxygenation measurement using continuous wave and spatially resolved near-infrared spectroscopy. *J Japanese Coll Angiol* 52: 211–215, 2012.
44. Racinais, S, Bishop, D, Denis, R, Lattier, G, Mendez-Villaneuva, A, and Perrey, S. Muscle deoxygenation and neural drive to the muscle during repeated sprint cycling. *Med Sci Sports Exerc* 39: 268–274, 2007.
45. Racinais, S, Cocking, S, and Périard, JD. Sports and environmental

- temperature: from warming-up to heating-up. *Temperature* 4: 227–257, 2017.
46. Racinais, S and Oksa, J. Temperature and neuromuscular function. *Scand J Med Sci Sport* 20: 1–18, 2010.
 47. Ramanathan, NL. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J Appl Physiol* 19: 531–533, 1964.
 48. de Ruiter, C, Jones, D, Sargeant, A, and de Haan, A. Temperature effect on the rates of isometric force development and relaxation in the fresh and fatigued human adductor pollicis muscle. *Exp Physiol* 84: 1137–1150, 1999.
 49. Russell, M, Tucker, R, Cook, CJ, Giroud, T, and Kilduff, LP. A comparison of different heat maintenance methods implemented during a simulated half-time period in professional Rugby Union players. *J Sci Med Sport* 21: 327–332, 2018.
 50. Russell, M, West, DJ, Briggs, MA, Bracken, RM, Cook, CJ, Giroud, T, et al. A passive heat maintenance strategy implemented during a simulated half-time improves lower body power output and repeated sprint ability in professional Rugby Union players. *PLoS One* 10: 1–10, 2015.
 51. Russell, M, West, DJ, Harper, LD, Cook, CJ, and Kilduff, LP. Half-time strategies to enhance second-half performance in team-sports players: a review and recommendations. *Sports Med* 45: 353–364, 2015.
 52. Sadoyama, T, Masuda, T, Miyata, H, and Katsuta, S. Fiber conduction velocity and fibre composition in human vastus medialis. *Eur J Appl Physiol* 57: 767–771, 1988.
 53. Sargeant, AJ. Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56: 693–698, 1987.

54. Silva, LM, Neiva, HP, Marques, MC, Izquierdo, M, and Marinho, DA. Effects of warm-up, post-warm-up, and re-warm-up strategies on explosive efforts in team sports: a systematic review. *Sports Med* 48: 2285–2299, 2018.
55. Sotiropoulos, K, Smilios, I, Christou, M, Barzouka, K, Spaias, A, Douda, H, et al. Effects of warm-up on vertical jump performance and muscle electrical activity using half-squats at low and moderate intensity. *J Sports Sci Med* 9: 326–31, 2010.
56. Spencer, M, Bishop, D, Dawson, B, and Goodman, C. Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med* 35: 1025–1044, 2005.
57. Stewart, D, Macaluso, A, and De Vito, G. The effect of an active warm-up on surface EMG and muscle performance in healthy humans. *Eur J Appl Physiol* 89: 509–513, 2003.
58. Takagi, S. Skeletal muscle oxygen dynamics and peak aerobic capacity. *J Phys Fit Sport Med* 5: 379–383, 2016.
59. Takagi, S, Murase, N, Kime, R, Niwayama, M, Osada, T, and Katsumura, T. Aerobic training enhances muscle deoxygenation in early post-myocardial infarction. *Eur J Appl Physiol* 116: 673–685, 2016.
60. Takizawa, K and Ishii, K. Relationship between muscle oxygenation, VO_2 , and high intensity aerobic exercise performance improving effect of warm-up. *Adv Exerc Sport Physiol* 12: 121–125, 2006.
61. Tillin, NA and Bishop, D. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med* 39: 147–166, 2009.
62. Towlson, C, Midgley, AW, and Lovell, R. Warm-up strategies of professional

- soccer players: Practitioners' perspectives. *J Sports Sci* 31: 1393–1401, 2013.
63. Weston, M, Batterham, AM, Castagna, C, Portas, MD, Barnes, C, Harley, J, et al. Reduction in physical match performance at the start of the second half in elite soccer. *Int J Sports Physiol Perform* 6: 174–182, 2011.
 64. Wilson, J, Duncan, N, Marin, P, Brown, L, Loenneke, J, Wilson, S, et al. Meta-analysis of postactivation potentiation and power: effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *J Strength Cond Res* 27: 854–859, 2013.
 65. Wittekind, A, Cooper, CE, Elwell, CE, Leung, TS, and Beneke, R. Warm-up effects on muscle oxygenation, metabolism and sprint cycling performance. *Eur J Appl Physiol* 112: 3129–3139, 2012.
 66. Woods, A and Bishop, P. Warm-up and stretching in the prevention of muscular injury. *Sports Med* 37: 1089–1099, 2007.
 67. Yaicharoen, P, Wallman, K, Morton, A, and Bishop, D. The effect of warm-up on intermittent sprint performance and selected thermoregulatory parameters. *J Sci Med Sport* 15: 451–456, 2012.
 68. Yanaoka, T, Kashiwabara, K, Masuda, Y, Yamagami, J, Kurata, K, Takagi, S, et al. The effect of half-time re-warm up duration on intermittent sprint performance. *J Sport Sci Med* 17: 269–278, 2018.
 69. Yanaoka, T, Yamagami, J, Kidokoro, T, Kashiwabara, K, and Miyashita, M. Halftime rewarm-up with intermittent exercise improves the subsequent exercise performance of soccer referees. *J Strength Cond Res* 32: 211–216, 2018.
 70. Yong, JR, Silder, A, and Delp, SL. Differences in muscle activity between natural forefoot and rearfoot strikers during running. *J Biomech* 47: 3593–3597,

- 2014.
71. Zois, J, Bishop, D, Fairweather, I, Ball, K, and Aughey, RJ. High-intensity re-warm-ups enhance soccer performance. *Int J Sports Med* 34: 800–805, 2013.
 72. Zois, J, Bishop, DJ, Ball, K, and Aughey, RJ. High-intensity warm-ups elicit superior performance to a current soccer warm-up routine. *J Sci Med Sport* 14: 522–528, 2011.
 73. 井上芳光、近藤徳彦. 体温Ⅱ 体温調整システムとその適応. 2010.
 74. 島典広、前田明、西菌秀嗣. 活動後増強による筋力及び筋パワー向上効果. *デサントスポーツ科学* 27: 217–223, 2006.

謝辞

2019年1月に本博士論文を提出するに至りました。本博士論文は早稲田大学大学院スポーツ科学研究科博士後期課程在籍中の研究成果をまとめたものであり、本論文提出にあたり、ご指導・ご支援を頂きました全ての皆様に御礼申し上げます。

特に、指導教員である早稲田大学スポーツ科学学術院の広瀬統一教授には、常に私の研究活動のご支援にご尽力いただき、ご多忙の中温かいご指導を頂きまして、心より感謝しております。博士後期課程の3年間では、悩むことも多く、ご相談させていただく機会が非常に多かったと記憶しています。その都度、私の至らない点をご指摘いただき、また同時に温かいお言葉をかけていただき、研究に対する想いやモチベーションを失うことなく3年間の研究活動を遂行することができました。広瀬先生の下でなければ、博士後期課程を修了することができなかったと思います。

また、ご多忙の中、快く副査を引き受けて下さりご指導を賜りました宮下政司准教授、岡田純一教授にも厚く御礼を申し上げます。宮下先生には東京学芸大学在籍時よりご指導いただきました。私の研究に対する姿勢や考え方は、宮下先生からのご指導で培われたもので、貴重な財産です。博士後期課程在籍時でも研究室が異なる中、常に温かいご指導を頂きました。ご迷惑をお掛けしたことは多かったと思いますが、6年間のご指導・ご鞭撻、誠にありがとうございました。岡田先生には、トレーニング科学・コンディショニングおよびスポーツ現場での応用の観点から大変貴重なご意見・アドバイスを頂きました。岡田先生のご指導があり、納得のいく博士論文に仕上げることができました。

同志社大学スポーツ健康科学部の高木俊助教、国際基督教大学の城所哲宏特任講師には第2章における研究を遂行するにあたり、多大なるご指導ならびにご助言を賜りましたことを深く感謝いたします。高木先生には筋酸素動態に関して、測定原理から結果の解釈までご丁寧にご指導いただきました。また論文投稿の際、リバイスの際にも何度もご指導いただきました。城所先生には東京学芸大学在席時よりお世話になり、大学の活動のみならずプライベートでもご指導・ご支援をいただきました。

研究活動に関わらず、博士後期課程での生活で常に温かく接していただいた広瀬研究室、宮下研究室、岡田研究室の皆様にも感謝申し上げます。自分自身が楽しく過ごしたい一心で、研究室では騒がしい学生であったと思います。そんな私でも常に受け入れてくださった皆様のおかげで、非常に密度濃く、思い出の詰まった学生生活を送ることができました。

そして、被験者としてご協力を賜りました早稲田大学の学部生、院生の皆様にも感謝を申し上げなければなりません。本論文における一連の研究は、実験にご協力して下さる皆様のご協力があって初めて成り立ちます。中には本論文における全ての研究にご参加してくださった方もいらっしゃる、皆様のご支援のおかげで本論文を提出することができました。誠にありがとうございました。

最後にはなりますが、長かった学生生活を通して、常に温かいサポートを頂いた家族に感謝の意を表します。東京学芸大学在席時には部活動、東京学芸大学・早稲田大学大学院在席時には研究活動や審判活動のために日本中を駆け巡り、その結果、一年の中でも実家で過ごすのは2、3日で、とても親不孝な子供であると自覚しています。そんな中でも実家に帰った時には温かく受け入れ、また近隣で試合があるときには応援に駆けつけてくれました。苦しい時、辛い時にはいつも家族が応援してくれているという思いから立ち止まることなく進み続けることができました。特に、2018年12月に亡くなった祖父には感謝を仕切れません。両親が共働きであったことから、いわゆるおじいちゃん・おばあちゃん子として幼少期を過ごしました。いつも仕事熱心で何事にも真面目に取り組む姿、趣味であった釣りを行う際には優しくやり方を教えてくれた姿は約20年たった今でも鮮明に覚えています。祖父のように常に愛を持って多くの人に接することが出来る人になれるように努力していくと共に、今後は家族にも恩返しができるように日々を過ごしていきたいと思っています。

2019年1月末日

柳岡 拓磨